



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : **LEBGAA ABDELKADIR**

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie Chimique

Thème

**Évaluation de la Performance d'adsorbant pour
la désorption des colorants organiques**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Pr. DJEDID Mebrouk	Professeur	Président
Dr. ADJEROUD Yasmina	MCA	Examinatrice
Dr. BOUDAUD Asma	MCA	Rapportrice
M ^{me} MECHRAOUI Nesrine	Doctorante	Co-rapportrice

Promotion : JUIN 2025



Dédicace



A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A ma chère sœur Dalal pour ses encouragements permanents, et son soutien moral,

A mes chers frères, Noureddine, Mohamed, Rayan et Mourad pour leur appui et leur encouragement. A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible.

Merci d'être toujours là pour moi.

 Abdelkadir LEBGAA





Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu Tout-Puissant, sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour, et sans qui je n'aurais pu atteindre ce niveau de formation.

J'exprime ma profonde gratitude à l'ensemble des enseignants de *l'Université Amar Telidji – Laghouat*, en particulier ceux du département de Génie des Procédés, pour la qualité de l'enseignement reçu tout au long de mon parcours.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mes encadrantes, le *Dr BOUDAOU D Asma* et Mme *MECHRAOUI Nesrine*, pour leur accompagnement précieux, leurs conseils avisés, leur patience et leur disponibilité tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont bien voulu consacrer de leur temps pour lire, évaluer et juger ce travail.

Je remercie chaleureusement mes collègues et amis de promotion, pour leur aide, leur soutien moral et les moments de camaraderie partagés durant notre parcours universitaire.

Enfin, j'adresse ma reconnaissance à toute personne, de près ou de loin, ayant contribué à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction général1

Chapitre I : Aperçu théorique

I.1. Introduction.....3

I.2. Pollution de l'eau par les colorants3

I.2.1. Définition des colorants3

I.2.2. Classification des colorants.....4

I.2.3 Classification tinctoriale.....6

I.2.4. Effet des colorants sur l'environnement9

I.3. Techniques d'élimination des colorants.....9

I.3.1 Méthodes physiques10

I.3.2 Méthode physico-chimique10

I.3.3 Méthodes chimiques.....10

I.4. Adsorption.....12

I.4.1. Définition de l'adsorption13

I.4.2. Types de l'adsorption13

I.4.3. Les facteurs influençant l'adsorption14

I.4.4. Mécanisme d'adsorption15

I.5. Désorption.....15

I.5.1. Définition de la désorption.....16

I.5.2. Facteurs influençant la désorption.....16

I.5.3. Équilibre entre adsorption et désorption18

I.5.4. Importance environnementale de désorption18

Chapitre II : Protocole Expérimental

II.1. Introduction	21
II.2. Appareillage et réactifs	21
II.2.1. Appareillage	21
II.2.2. Réactifs	22
II.2.3. Préparation des réactifs	23
II.2.4 Préparation de l'adsorbant	24
II.3. Techniques d'analyse	25
II.3.1 Spectrophotométrie UV-Visible.....	25
II.4. Essais d'adsorption.....	26
II.4.1. Influence de la masse d'adsorbant	26
II.4.2. Influence du pH	26
II.4.3. Influence du temps de contact	27
II.4.4. Influence de la température.....	27
II.5. Essais de désorption.....	27
II.5.1. Préparation de l'adsorbant saturé en colorant.....	27
II.5.2. Expérimentation de la désorption	28
II.5.3. Calcul du taux de désorption	28

Chapitre III : Résultats et Discussion

III.1. Introduction	29
III.2. La capacité d'adsorption	29
III.3 Tracé de la courbe d'étalonnage	30
III.4 Effet des paramètres opératoires	31
III.4.1 Effet de temps de contact.....	31
III.4.2 Effet de pH	32
III.4.3 Effet de la température.....	34
III.6. Évaluation de la désorption	36
III.6.1. Sélection du solvant.....	36
III.6.2. Les cycle de désorption	39
III.6.3. Analyse comparative des résultats de désorption avec la littérature.....	40

III.7. Conclusion.....	43
Conclusion général.....	44
Références bibliographiques.....	46
Résumé	

Liste des abréviations

BM : Bleu de Méthylène

FB : Fuchsine basique

NaOH : Hydroxyde de sodium

HCl : Acide chlorhydrique

NaCl : Chlorure de sodium

UV-Vis : Spectrophotométrie Ultra-Violet Visible

Qt : Quantité adsorbée à l'instant t (mg/g)

C₀ : Concentration initiale du colorant (mg/L)

C_e : Concentration du colorant à l'équilibre (mg/L)

R : Rendement d'adsorption ou de désorption (%)

T : Température (°C)

pH : Potentiel hydrogène

m : Masse de l'adsorbant (g)

V : Volume de la solution (L)

Liste des figures

Figure I.1: Groupe fonctionnel azoïque	4
Figure I.2: Structure chimique du colorant anthraquinone.....	5
Figure I.3: Structure de l'indigo.....	5
Figure I.4: Structure du colorant triphénylméthane	5
Figure I.5: Structure des colorants xanthènes	6
Figure I.6: Structure des colorants nitrés et nitrosés	6
Figure I.7: Structure moléculaire du colorant rouge acide.....	7
Figure I.8: Exemples de colorant réactifs.....	7
Figure I.9: La synthèse du rouge de p-nitroaniline	8
Figure I.10: Schéma simplifié représentant le phénomène d'adsorption.	13
Figure I.11 : Schéma du processus d'adsorption et de désorption.....	16
Figure II.1:Un ballon volumétrique d'une solution de bleu de méthylène.....	23
Figure II.2: Le protocole expérimental de préparation d'adsorbant.....	24
Figure. II.3: Aspect des déchets Agricoles après le après broyage	25
Figure II.4: Spectrophotomètre UV-Visible	26
Figure III.1: Courbe d'étalonnage du FB	30
Figure III.2: Courbe d'étalonnage du BM.....	31
Figure III.3: Influence du temps de contact sur l'adsorption du FB.....	31
Figure III.4: Influence du temps de contact sur l'adsorption du MB	32

Figure III.5: Influence du pH de la solution sur l'adsorption du FB	32
Figure III.6: Influence du pH de la solution sur l'adsorption du MB.....	33
Figure III.7: Influence du la Température sur l'adsorption du FB.....	34
Figure III.8: Influence du la Température sur l'adsorption du MB	34
Figure III.09 : Taux de désorption de FB avec différents solvants	37
Figure III.10 : Taux de désorption de BM avec différents solvants	38
Figure III.11 : Taux de désorption du FB selon le nombre de cycles.....	39
Figure III.12 : Taux de désorption du BM selon le nombre de cycles	40

Liste des tableaux

Chapitre I : Aperçu théorique

- Tableau I.1 : Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluent liquide de l'industrie textile.....9
- Tableau I.2: Différence entre les traitements des eaux usées aérobie et anaérobie.....12
- Tableau I.3: Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.....14

Chapitre II : Protocole Expérimental

- Tableau II.1. Réactifs et leurs propriétés avec leur pureté22

Chapitre III : Résultats et Discussion

- Tableau III.2. Analyse comparative des résultats de désorption pour les colorants BM et FB avec différentes solutions (NaOH, HCl, NaCl)38
- Tableau III.3. Comparaison du nombre de cycles de désorption pour les colorants FB et BM selon différentes études de master.....41

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, la rareté de l'eau douce est devenue un défi environnemental majeur à l'échelle mondiale, avec une répartition inégale à travers le monde. D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), environ 30 % de la population mondiale n'a pas accès à une eau potable à domicile.

Les processus de teinture, d'impression et d'apprêt sont responsables d'un rejet massif de colorants synthétiques dans l'environnement. En raison de leur stabilité chimique et de leur faible biodégradabilité, ces colorants industriels ont un impact environnemental significatif. Selon l'OMS, 80 % des maladies dans le monde seraient liées à la pollution de l'eau.

Pour lutter contre la pollution de l'eau, plusieurs technologies ont été développées, notamment les procédés d'oxydation avancés, les traitements biologiques et l'adsorption. Parmi elles, l'adsorption est la plus efficace et la plus utilisée pour éliminer les polluants organiques. Cependant, elle génère des déchets solides composés de matériaux adsorbants saturés de polluants.

La désorption joue un rôle clé en permettant la régénération de ces matériaux, favorisant leur réutilisation, réduisant les coûts et limitant la production de déchets. Elle facilite également la récupération des polluants pour un traitement ultérieur. Ainsi, l'association adsorption-désorption constitue un cycle indispensable pour un traitement durable et économique des eaux contaminées.

Dans cette étude, nous évaluons l'efficacité des déchets agricoles comme adsorbant naturel pour l'élimination de deux colorants synthétiques : le Bleu de Méthylène (BM) et le Fushine Basique (FB), par le biais du processus d'adsorption. Nous analysons l'influence de plusieurs paramètres expérimentaux, notamment la masse de l'adsorbant, le temps de contact, la température et le pH.

A fin d'optimiser la réutilisation de l'adsorbant, nous étudions le processus de désorption, qui permet de libérer les colorants adsorbés et ainsi d'envisager la régénération de la bentonite pour de futurs cycles d'adsorption.

Ce travail est structuré en deux parties principales :

Le premier chapitre est une étude théorique qui donne un aperçu général de la pollution de l'eau par les colorants, leurs effets sur la santé et l'environnement, ainsi que les techniques d'élimination existantes. Une attention particulière est accordée à la technique d'adsorption, avec une explication détaillée de sa définition, ses types,

les facteurs qui l'influencent. Ensuite, nous abordons le processus de désorption, en définissant ses principes, les facteurs qui l'affectent, l'équilibre entre adsorption et désorption, et son importance environnementale.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale, où nous décrivons les équipements et réactifs utilisés, ainsi que la préparation des échantillons et des adsorbants. Nous détaillons les techniques d'analyse employées et présentons les essais d'adsorption réalisés pour évaluer l'efficacité des déchets agricoles dans l'élimination des deux colorants étudiés. Enfin, nous procédons aux essais de désorption afin d'évaluer la possibilité de réutilisation de l'adsorbant.

Enfin, nous concluons cette étude par une synthèse des résultats obtenus et proposons des perspectives de recherche pour l'amélioration des performances de l'adsorption et la valorisation de la désorption pour une réutilisation efficace des adsorbants.

Chapitre I

Aperçu théorique

I.1. Introduction

La pollution de l'eau par les colorants organiques est une problématique environnementale majeure, notamment en raison de leur utilisation intensive dans les industries textiles, alimentaires et pharmaceutiques. Ces colorants, souvent résistants à la biodégradation, persistent dans l'environnement et peuvent engendrer des effets nocifs sur la santé humaine et les écosystèmes aquatiques... [1].

Face à ces enjeux, différentes techniques de traitement ont été développées, parmi lesquelles l'adsorption est reconnue comme une méthode efficace et économique pour l'élimination des polluants organiques. Cependant, la saturation des adsorbants limite leur efficacité à long terme, ce qui rend essentielle l'étude des mécanismes de désorption afin de permettre leur régénération et leur réutilisation [2].

Ce chapitre se concentre sur la pollution des eaux par les colorants, les différentes techniques d'élimination existantes, ainsi que les principes fondamentaux de l'adsorption et de la désorption, en mettant en évidence leurs mécanismes et facteurs influents [3].

I.2. Pollution de l'eau par les colorants

Lorsqu'on modifie les caractéristiques naturelles de l'eau (physicochimiques, biologiques et bactériologiques) en ajoutant certaines matières solides (matières en suspension), ou dissoutes, pour déséquilibrer biologiquement le milieu, on est entrain de polluer de l'eau, c'est à dire la rendre impropre à toute réutilisation (consommation humaine, usage industriel, etc.) [4].

La pollution des eaux de surface est la plus importante. Elles contiennent des grandes quantités de polluants résultants des rejets chimiques de nos industries, de notre agriculture, de nos activités quotidiennes, etc [5].

I.2.1. Définition des colorants

Les colorants sont des composés généralement organiques, naturels ou synthétiques qui ont la propriété de colorer durablement le support sur lequel ils sont appliqués [6]. Les colorants sont largement utilisés dans les imprimeries, les produits alimentaires, cosmétiques et cliniques. Cependant, ces colorants sont à l'origine de la pollution une fois évacués dans l'environnement [7]. Ils sont caractérisés par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (380 à 750 nm) [8]. En général, les colorants consistent en un assemblage de groupes chromophores, auxochromes et de structures aromatiques [9].

On dénombre environ 8000 colorants synthétiques chimiques différents, sous 40000 dénominations commerciales. Les colorants synthétiques sont commercialisés sous différentes formes solides (poudres, granulés) ou liquides (solutions concentrées, dispersions ou pâtes) [10].

I.2.2. Classification des colorants

Les colorants ont une structure très variée et peuvent être classés de différentes manières, selon leur nature, leur structure chimique ou selon leur domaine d'application.

a. Classification des colorants selon leur nature

Colorants naturels

Les colorants naturels sont extraits des éléments naturels par des procédés simples comme le chauffage ou le broyage, ils ont été très utilisés dans l'industrie du textile, du cuir et du papier pour des traitements spéciaux [11].

Colorants synthétiques

Ces colorants sont principalement synthétisés à partir de produits pétroliers, notamment le benzène et ses dérivés (toluène, naphthalène, xylène et anthracène) [12]. Comparés aux colorants naturels, ils sont relativement faciles à synthétiser, rapides à produire et ont une grande variété de couleurs, ils sont donc de plus en plus utilisés dans les industries de la teinture et du textile [13].

b. Classification chimique

Les colorants sont classés selon leur structure chimique en fonction de la nature du groupe chromophore. Il s'agit du squelette nécessaire à la coloration de la molécule [14].

Colorants azoïques

Appelés ainsi en raison de la présence du groupe fonctionnel azoïque ($-N=N-$), Ce type de colorant est toxique, cancérigène et résistant à la biothérapie [15].

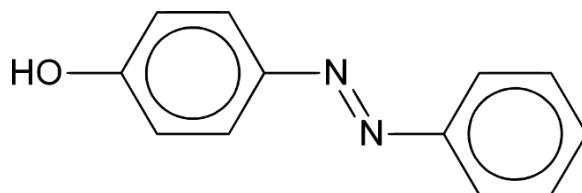


Figure I.1: Groupe fonctionnel azoïque [19].

Cette catégorie de colorant est actuellement la plus populaire car elle est largement utilisée, comptant pour plus de 50% de la production mondiale de colorants [16].

Colorants Anthraquinoniques

Ces colorants représentent 15 % des colorants synthétiques et occupent la deuxième classe de colorants commerciaux [17].

La structure du colorant est basée sur un noyau anthraquinone où le chromophore carbonyle ($>C=O$) est présent sur le noyau quinone comme chromogène.

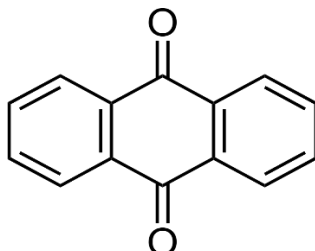


Figure I.2: Structure chimique du colorant anthraquinone [19].

Les colorants anthraquinones ont une large gamme de teintes (toutes les couleurs du spectre visible) [18].

Colorants indigoïdes

Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo qui est obtenu à partir de l'association de deux molécules d'indoxyle avec déshydrogénation [19].

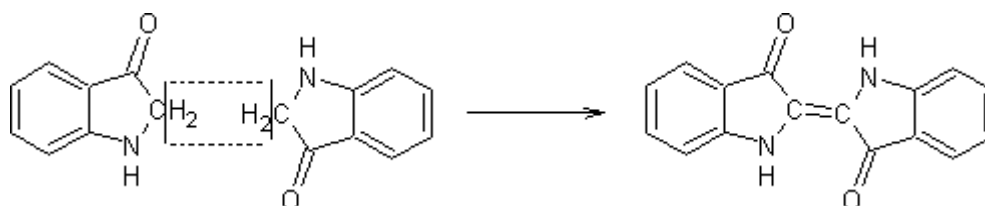


Figure I.3: Structure de l'indigo [19].

Colorants triphénylméthane

Ce sont des dérivés du méthane et se composent de trois cycles benzéniques liés au carbone central.

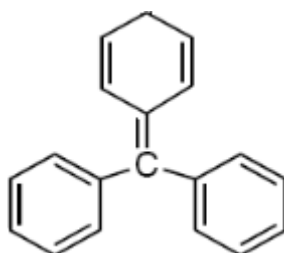


Figure I.4: Structure du colorant triphénylméthane [19].

Ce type de colorants ont une grande importance commerciale car ils sont très

largement utilisés dans l'industrie du papier et du textile. Ils sont également utilisés comme antifongique pour les poissons et volaille [20].

Colorants xanthènes

Ils sont composés de trois cycles, un cycle de pyranne et deux cycles de benzène

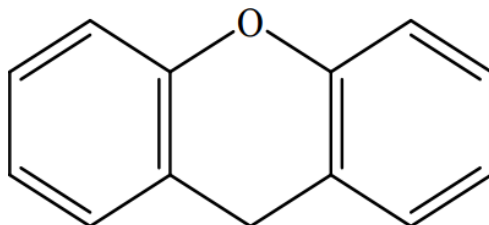


Figure I.5: Structure des colorants xanthènes [19].

Ils sont caractérisés par une intense fluorescence et sont utilisés comme teinture de textile et comme colorants dans l'alimentation et l'impression [21].

Colorants nitrés et nitrosés

Ces colorants sont caractérisés par le groupement (-NO₂) qui porte en position ortho un électrodonneur (hydroxyle ou groupes aminés), Ils sont utilisés pour la coloration des papiers [20].

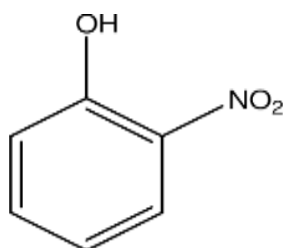


Figure I.6: Structure des colorants nitrés et nitrosés [19].

I.2.3 Classification tinctoriale

Dans cette classification, on peut trouver des informations concernant le domaine d'application des colorants, en effet, il est possible de connaître la solubilité des colorants dans le bain de teinture, l'affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation [19].

Colorants acides ou anioniques

Leur molécule comporte une ou plusieurs fonctions acides, ils sont appelés anioniques à cause de l'apparition des anions comme (-SO₃⁻, -O⁻). Ils forment des liaisons ioniques avec des supports à sites cationiques, essentiellement (-NH₃⁺) [22].

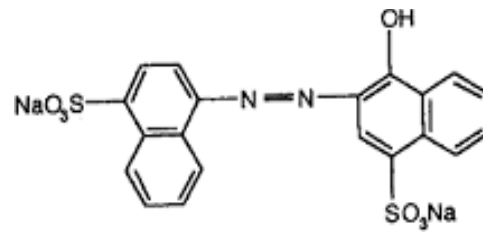


Figure I.7: Structure moléculaire du colorant rouge acide [19].

Ils permettent de teindre les fibres animales et quelques fibres acryliques modifiées comme le nylon en bain légèrement acide [23].

Colorants basiques ou cationiques

Ces colorants sont appelés aussi cationiques car ils comportent des cations ($-NH_3^+$) qui forment des liaisons ioniques avec des supports à sites anioniques comme ($-COO^-$) terminaux de la laine, de la soie, des polyamides et aussi les ($-SO_3^-$) des fibres acryliques greffées (polyacrylonitrile sulfoné) [22]. Ils sont utilisés pour la teinture du coton et de certains types de polyamides et de polyesters modifiés [21].

Colorants réactifs

Les molécules de colorants réactifs contiennent des groupements qui peuvent réagir chimiquement avec les fibres. Les colorants réagissent avec les fibres lors de la teinture, et forment une liaison covalente entre les deux pour former un tout, ce qui améliore la solidité au lavage et la solidité au frottement [24].

Le colorant doit comporter un groupement vinylsulfone ($-SO_2-CH=CH_2$) ou un groupement triazine chloré [21].

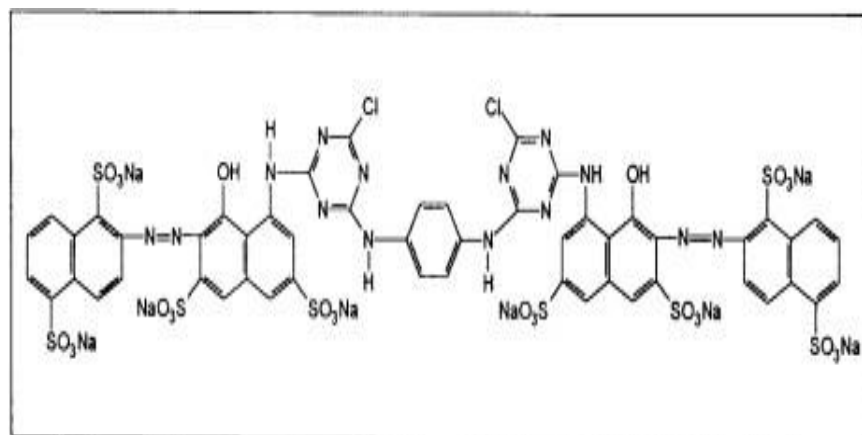


Figure I.8: Exemples de colorant réactifs [49].

Ces colorants conviennent dans la teinture du coton et éventuellement dans celle de la laine et des polyamides.

Colorants de cuve

Le terme traditionnel "colorants de cuve" provient du fait que cette méthode de teinture ne nécessite pas de températures supérieures à 50°C, et utilise des cuves en bois ou en céramique au lieu de récipients en métal [22].

Ces colorants sont utilisés dans la teinture de la fabrication du vernis à cause de leur grande stabilité à la lumière [25].

Colorants développés ou azoïques insolubles

Des colorants synthétisés sur la fibre par une copulation avec le β -naphthol et le produit de diazotisation de la 4-nitroaniline à température de 0 à 5 °C en présence d'acide sulfurique H_2SO_4 et de nitrite de sodium $NaNO_2$.

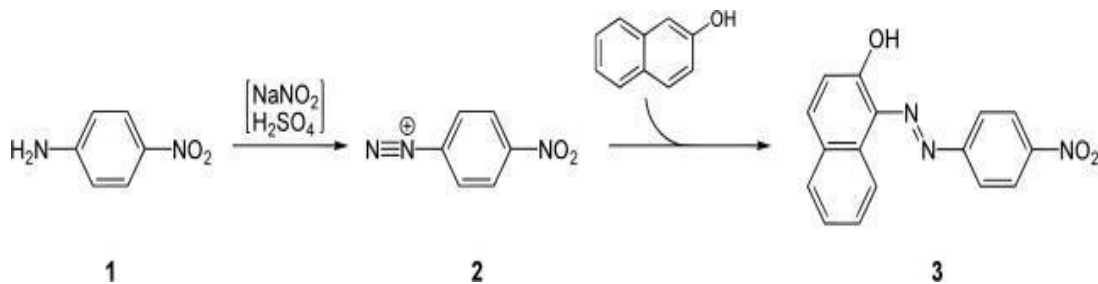


Figure I.9: La synthèse du rouge de p-nitroaniline [19].

Colorants à mordants

Ce sont des colorants fixés sur la fibre grâce à un intermédiaire appelé mordant qui existe soit sous forme d'ion métallique (aluminium, chrome, cobalt, cuivre, nickel ou fer) soit sous forme d'un polyphénol [22].

Colorants dispersés

Ce sont des colorants synthétiques utilisés dans le polyester et les fibres hydrophobes apparentées. Ce sont des molécules polaires contenant des groupements anthraquinone ou azoïque. On estime que 85 % des colorants dispersés sont des colorants azoïques ou anthraquinoniques [26].

Ils sont de natures non ioniques et partiellement solubles dans l'eau. Ces colorants ont une meilleure diffusivité lorsqu'ils sont portés à des températures élevées [27].

Colorants au soufre

Le terme "colorants au soufre" désigne les substances organiques contenant du soufre utilisées pour colorer les fibres, car elles restent dans les fibres en raison de leur insolubilité. [22]

I.2.4. Effet des colorants sur l'environnement

La toxicité des colorants (effet mutagénique et cancérigène) a été étudiée sur des organismes aquatiques (poissons, algues, bactéries, etc.) ainsi que sur les mammifères.

Les colorants basiques sont les plus toxiques pour les algues. Un test été fait sur les poissons où avec 3000 colorants commerciaux il a été confirmé que les colorants basiques (les triphénylméthanes) sont les plus toxiques.

D'autre part, un examen de mortalité sur les rats a montré que 1% de 4461 colorants commerciaux ont des valeurs de DL50 inférieures à 250 mg.kg^{-1} (la masse de substance nécessaire pour tuer 50 % des animaux, en milligrammes de substance par kilogramme d'animal). Donc la toxicité aiguë envers les humains par les colorants est très faible et quelques colorants peuvent provoquer des allergies ou autres.

L'exposition aux colorants azoïques fait augmenter le nombre de cancers chez les ouvriers de l'industrie textile. [28]. Face à ce problème de pollution, les entreprises du secteur de textile algérien respectent la réglementation diffusée dans le journal officiel 06-141. A cet effet les effluents liquides issus de ces dernières doivent répondre aux valeurs limites des rejets définies dans le tableau I.1 [29].

Tableau I.1 Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluent liquide de l'industrie textile [29]

Paramètres	Unité	Valeurs limites
Température	°C	30
pH		6.5-8.5
DBO ₅	mg/L	200
DCO	mg/L	300
MES	mg/L	40
Oxydabilité	mg/L	120
Permanganates	mg/L	25

I.3. Techniques d'élimination des colorants

Il existe plusieurs techniques mises au point pour l'élimination des polluants

organiques à l'échelle industrielle, tels que des traitements physiques et physico-chimique (adsorption, technologie membranaire, des procédés de séparation solide-liquide comme la précipitation, la coagulation, la floculation et la décantation), des traitements chimiques qui repose sur les procédés d'oxydation avancés et des traitements biologiques (traitements aérobie et anaérobie) [30].

I.3.1 Méthodes physiques

- **Adsorption sur charbon actif**

Le charbon actif est l'un des adsorbants les plus couramment utilisés pour l'élimination des polluants des eaux, en raison de sa grande surface spécifique et de sa porosité élevée, lui permettant d'adsorber une large gamme de composés organiques, y compris les colorants. Il agit par adsorption physique et chimique, ce qui en fait une solution efficace pour l'élimination des colorants des effluents industriels. Toutefois, le coût élevé de sa régénération et de sa réactivation constitue un défi économique et environnemental pour son utilisation à grande échelle.[31].

- **Filtration membranaire**

Ce processus est réalisé en transférant le solvant à travers une membrane en appliquant une différence de pression. La taille des pores de cette membrane permet la rétention du soluté et détermine également la classe du processus.

On distingue quatre classes de procédés selon la taille des pores décroissantes : la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse. Parmi ces procédés, la nanofiltration et l'osmose inverse restent les meilleures et les plus répandues pour la rétention partielle de la couleur et des petites molécules organiques [33,34].

I.3.2 Méthode physico-chimique

- **Coagulation – floculation**

Cette méthode, utilisant des flocculants chimiques, est basée sur la transformation des particules colloïdales ou des solides en suspension en floccs, qui sont ensuite séparés par décantation et filtration en vue de leur élimination. Les floccs sont des agrégats volumineux, visibles et donc facile à séparer par coagulation [34].

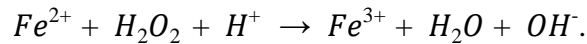
I.3.3 Méthodes chimiques

Les techniques les plus souvent appliquées sont les procédés d'oxydation avancés, qui sont utilisés pour l'élimination des composés organiques dangereux en faibles quantités,

la diminution de la toxicité et le traitement des eaux usées chargées en composés biodégradables. Parmi ces procédés en peut citer :

- **Procédé électro-Fenton**

C'est un procédé basé sur la réaction de Fenton avec formation de radicaux hydroxyle :



Les radicaux hydroxyle sont obtenus à partir de l'application d'un faible potentiel à la cathode dans une solution saturée en O₂ en présence de catalyseur (fer ferrique Fe³⁺) [32].

Ces radicaux détruisent les polluants organiques et assurent ainsi la détoxification de la solution [30].

- **L'Ozonation (O₃)**

L'Ozonation est une méthode de traitement utilisant des réactifs chimiques oxydants (l'ozone O₃) pour la stérilisation de l'eau et la destruction des germes pathogènes. Ce traitement est basé sur deux types de réaction, la première se fait de manière directe avec la molécule d'ozone et la deuxième se fait de manière indirecte avec les radicaux libres. Qui provient de la décomposition de l'ozone lorsqu'il est mis en contact avec l'eau [35].

- **Peroxonation (O₃/ H₂O₂)**

C'est une méthode basée sur le couplage entre le peroxyde d'hydrogène et l'ozone pour former des radicaux libres.

Cette méthode est plus performante que l'ozonation parce que le peroxyde d'hydrogène réagit très rapidement sur l'ozone et donc accélère la décomposition de ce dernier dans l'eau en produisant davantage de radicaux hydroxyles [36].

Cette méthode est efficace pour éliminer les micropolluants ou composés toxiques (pesticides, hydrocarbures, etc.) présents dans les eaux potables et les eaux résiduaires industrielles [36].

I.3.4 Traitement Biologiques

Le traitement biologique est la conversion bactérienne de la contamination en dioxyde de carbone, il y a deux catégories de procédés biologiques : le traitement aérobie qui se fait en présence d'oxygène, et le traitement anaérobie qui lui se déroule sans apport d'oxygène [37].

Les principales différences entre les deux procédés sont mentionnées dans le Tableau 1.2.

Tableau I.2: Différence entre les traitements des eaux usées aérobie et anaérobie [38, 39].

Traitement aérobie	Traitement anaérobie
- Environnement riche en oxygène	- Environnement sans oxygène
- Circulation de l'air dans les réservoirs aérobies de traitement des eaux usées.	- Absence de circulation d'air
- Pas de biogaz	- Production de biogaz
- Consomme moins d'énergie	- Consomme plus d'énergie

I.4. Adsorption

L'adsorption est un phénomène physico-chimique se traduisant en particulier par une modification de concentration à l'interface de deux phases non miscibles. L'adsorption C'est un phénomène de surface, à distinguer de l'absorption, phénomène de profondeur.

Il existe cinq types d'interfaces selon la nature des deux phases contiguës : (gaz/liquide), (gaz/solide), (liquide/liquide), (liquide/solide), (solide/solide), et pour chacun de ces types d'interfaces, on peut distinguer le cas où ces phases sont pures de celui où elles constituent des mélanges.

Les phénomènes d'adsorption se rapportant aux interfaces liquide/solide, à savoir donc l'adsorption des liquides, purs ou en mélange, par les solides considérés généralement comme des phases pures.

L'adsorption par un solide peut être définie comme étant le phénomène physique de fixation de molécule à la surface du solide par des forces d'interaction faible de type Van der waals.

On appelle « adsorbat » la molécule qui s'adsorbe et « adsorbant » le solide sur lequel s'adsorbe la molécule. Le phénomène inverse par lequel les molécules se détachent est la désorption, comme montre la (figure I.10) [49].

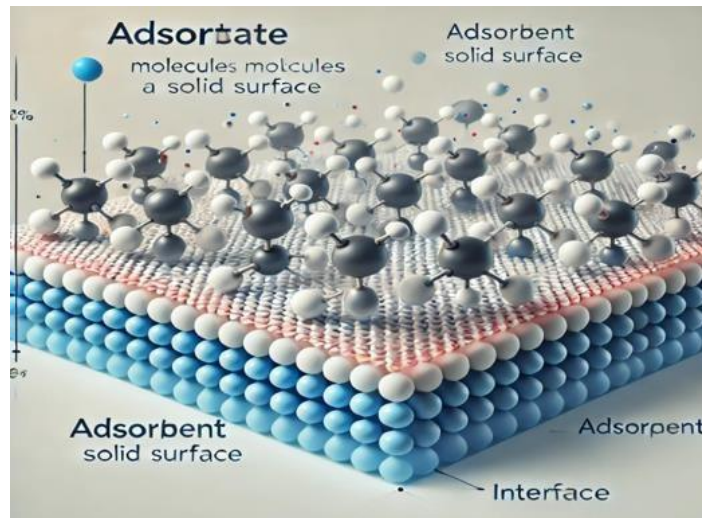


Figure I.10: Schéma simplifié représentant le phénomène d'adsorption.

I.4.1. Définition de l'adsorption

L'adsorption est un phénomène de fixation de molécules d'un fluide sur la surface d'un solide, ce qui augmente la concentration des molécules de ce fluide sur la surface du solide sans pour autant modifier le volume de ce milieu poreux [41].

C'est un processus physique et ou chimique dans lequel une substance s'accumule à l'interface entre les phases, ce dernier peut être solide-liquide, liquide-liquide, gaz-liquide ou gaz-solide. L'adsorbate étant la substance retirée de la phase liquide et l'adsorbant : la phase solide sur laquelle l'accumulation a lieu [42].

I.4.2. Types de l'adsorption

Il est possible de distinguer deux types d'adsorption :

a. Adsorption physique (physisorption)

Dans l'adsorption physique, les forces intermoléculaires faibles, dites forces de Van der Waals interviennent dans l'attraction et la fixation des espèces dissoutes par le substrat solide. C'est un processus instantané car la vitesse d'adsorption est très rapide. Ce type d'adsorption est favorisé par une diminution de la température car elle se caractérise par une réversibilité rapide [44].

b. Adsorption chimique (chimisorption)

L'adsorption chimique résulte, par contre, de l'établissement de liaisons chimiques souvent de nature covalente ou ionique comme dans le cas de l'échange d'ions (couple de charges opposées). Dans ce type d'adsorption, le phénomène de fixation peut être irréversible et conduit à la modification chimique de l'espèce adsorbée [44].

Le tableau I-1 représente une comparaison entre les deux types d'adsorption qui peuvent intervenir dans les mécanismes d'adsorption.

Tableau I.3: Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique [44]

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Types de liaison	Liaison de Van der Waals	Liaison chimique
Température du Processus	Relativement faible comparée à T d'ébullition de l'adsorbât	Plus élevée que la T d'ébullition de l'adsorbât
Individualité des Molécules	L'individualité des molécules est conservée	Destruction de l'individualité des molécules
Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide, indépendante de T	Très lente
Chaleur d'adsorption	Inférieur à 10 kcal/mole	Supérieur à 10 kcal/mole
Énergie mise en jeu	Faible	Élevée
Type de formation	Formation en multicouches	Formation en monocouche

I.4.3. Les facteurs influençant l'adsorption

Plusieurs paramètres influent sur l'adsorption, les plus importants sont :

a. La température du milieu

L'adsorption physique s'effectue à des basses températures (phénomène exothermique) alors que l'adsorption chimique demande des températures plus élevées (phénomène endothermique). Ceci nécessite de fixer la température du processus dès le départ [40].

b. Le pH de la solution

Le pH est un facteur important dans toute étude d'adsorption du fait qu'il peut influencer à la fois la structure de l'adsorbant et de l'adsorbât ainsi que le mécanisme d'adsorption [45].

c. La masse d'adsorption

La recherche de la masse minimale nécessaire et suffisante d'un matériau pour adsorber un polluant donné, est une étape primordiale à toute étude sur l'adsorption, car elle joue un rôle très important sur le mécanisme d'adsorption et sur le coût de l'adsorbant [45].

d. La concentration initiale d'adsorbant

La concentration initiale de polluant est un paramètre qui influe sur la capacité d'adsorption [46].

e. Le temps d'équilibre

Le temps d'équilibre est l'un des facteurs les plus importants de point de vue économique

pour les systèmes de traitement des eaux polluées [47].

f. Facteurs caractérisant l'adsorbant

Toutes les substances ne sont pas adsorbables de la même manière. La capacité de rétention d'un polluant est fonction de [48]:

- L'énergie de liaison de la substance à adsorber.
- La structure et la taille des molécules (un haut poids moléculaire réduit la diffusion et par conséquent la fixation de l'adsorbât).
- La solubilité (moins une substance est soluble, mieux elle est adsorbée).

g. Facteurs caractérisant l'adsorbant

Un solide adsorbant est caractérisé par des propriétés physicochimiques, mécaniques et géométriques, les plus importantes sont les propriétés géométriques.

- La surface spécifique : plus la surface est grande, plus on aura une meilleure adsorption
- La structure de l'adsorbant : l'adsorption d'une substance croît avec la diminution de la taille des particules et les dimensions des pores de l'adsorbant. Mais si le diamètre des pores est inférieur au diamètre des molécules, l'adsorption de ce composé sera négative, même si la surface de l'adsorbant a une grande affinité pour le composé. La distribution des tailles des pores joue un rôle important dans la cinétique globale du processus d'adsorption.
- La polarité : les solides polaires adsorbent préférentiellement les corps polaires, et les solides apolaires adsorbent les corps apolaires [48].

I.4.4. Mécanisme d'adsorption

Le transfert d'une phase liquide contenant l'adsorbât (molécule qui s'adsorbe) vers une phase solide (l'adsorbant) avec rétention de soluté à la surface de l'adsorbant peut être décomposé en quatre étapes [43]:

- Etape 1 : transfert de la particule (très rapide).
- Etape 2: déplacement de l'eau liée jusqu'à être en contact de l'adsorbant (rapide).
- Etape 3 : diffusion à l'intérieur de l'adsorbant sous l'influence du gradient de concentration (lente).
- Etape 4 : adsorption dans un micropore (très rapide).

I.5. Désorption

La désorption est le processus opposé à l'adsorption, consistant en la libération des molécules adsorbées de la surface de l'adsorbant, leur permettant de retourner à l'état liquide

ou gazeux. Ce mécanisme joue un rôle essentiel dans la régénération des adsorbants et l'amélioration de l'efficacité des procédés de traitement des effluents.

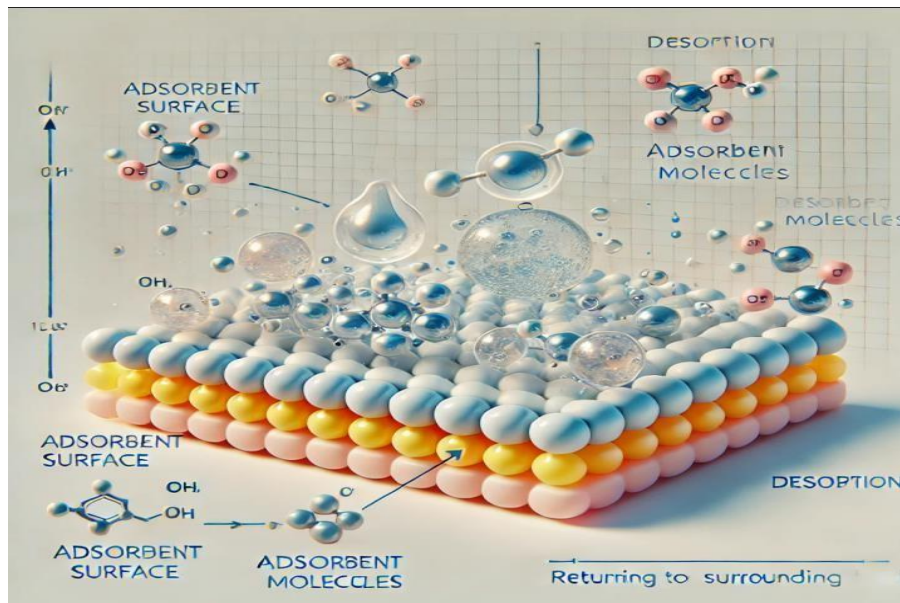


Figure I.11 : Schéma du processus d'adsorption et de désorption [8]

I.5.1. Définition de la désorption

La désorption est le processus physique par lequel des atomes ou des molécules adsorbés sont libérés d'une surface dans le vide ou le fluide environnant. Cela se produit lorsqu'une molécule acquiert suffisamment d'énergie pour surmonter la barrière d'activation et l'énergie de liaison qui la maintient attachée à la surface.

La désorption est l'inverse du processus d'adsorption, qui diffère de l'absorption en ce que l'adsorption fait référence aux substances liées à la surface, plutôt que d'être absorbées dans la masse [50].

La désorption peut être le résultat de plusieurs processus, ou d'une combinaison de ceux-ci : elle peut résulter de la chaleur (énergie thermique), de la lumière incidente telle que des photons infrarouges, visibles ou ultraviolets, ou d'un faisceau incident de particules énergétiques telles que des électrons. Elle peut également se produire à la suite de réactions chimiques telles que l'oxydation ou la réduction dans une cellule électrochimique ou après une réaction chimique d'un composé adsorbé dans laquelle la surface peut agir comme catalyseur [50].

I.5.2. Facteurs influençant la désorption

Le processus de désorption est influencé par plusieurs facteurs physico-chimiques qui déterminent l'efficacité avec laquelle une substance adsorbée peut être libérée de la surface de

l'adsorbant. Ces facteurs sont essentiels pour optimiser la régénération des adsorbants et la récupération des substances adsorbées [51, 52].

a. Nature des interactions adsorbant-adsorbat

- Physisorption : lorsque l'adsorption est due aux forces de Van der Waals, la désorption est généralement facile et peut être favorisée par des modifications de température ou de pression [51].
- Chimisorption : lorsque des liaisons chimiques fortes sont impliquées, la désorption est plus difficile et nécessite souvent un traitement chimique ou thermique [52].

b. Température

L'augmentation de la température peut favoriser la désorption en apportant l'énergie nécessaire pour briser les interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat [51]. Ce phénomène suit la règle de Le Chatelier, où une température plus élevée favorise le processus inverse de l'adsorption [52].

c. pH du milieu

Le pH joue un rôle clé dans la désorption, en particulier pour les substances ioniques [53] : Un pH acide ou basique peut modifier la charge de l'adsorbant et de l'adsorbat, facilitant ainsi leur séparation [51].

Exemple : la désorption de colorants cationiques est favorisée dans des milieux basiques, tandis que celle des colorants anioniques est plus efficace en milieu acide [52].

d. Concentration et type de solvant

Certains solvants peuvent favoriser la désorption en modifiant la solubilité de l'adsorbat [53]:

- L'utilisation de solutions salines peut réduire les interactions électrostatiques et favoriser la désorption [51].
- L'ajout de solvants organiques (éthanol, acétone) peut modifier l'affinité entre l'adsorbat et l'adsorbant [52].

e. Pression et agitation

- Réduction de la pression (dans les systèmes gazeux) peut faciliter la libération des molécules adsorbées [52].
- Augmentation de l'agitation améliore le transfert de masse et favorise la désorption en réduisant la résistance à la diffusion [53].

f. Temps de contact

Un temps de contact prolongé peut permettre d'atteindre un équilibre entre adsorption et désorption. Cependant, certains systèmes nécessitent une action rapide pour éviter des phénomènes de ré-adsorption [51-53].

I.5.3. Équilibre entre adsorption et désorption

L'équilibre entre adsorption et désorption est un phénomène dynamique où le taux d'adsorption des molécules sur un adsorbant est égal au taux de désorption de ces molécules vers le milieu environnant. Cet équilibre est fondamental pour comprendre le comportement des adsorbants et optimiser leur réutilisation dans des applications industrielles et environnementales [51,52].

a. Définition de l'équilibre adsorption-désorption

L'équilibre est atteint lorsque la quantité de soluté adsorbée par unité de masse d'adsorbant ne change plus au fil du temps. Cela signifie que le flux entrant de molécules adsorbées est exactement compensé par le flux sortant de molécules désorbées [51].

b. Facteurs influençant l'équilibre

L'équilibre entre adsorption et désorption dépend de plusieurs paramètres [51-53] :

- Température : une augmentation de la température favorise généralement la désorption et inversement [52].
- pH : influence la charge de l'adsorbant et du soluté, modifiant ainsi leur interaction [53].
- Concentration du soluté : une concentration plus élevée peut déplacer l'équilibre vers une adsorption accrue [51].
- Nature chimique des molécules impliquées : la force des interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat affecte l'équilibre [52].

c. Importance de l'équilibre adsorption-désorption

- Dans le traitement des eaux : permet d'optimiser la régénération des adsorbants et d'améliorer l'efficacité des procédés d'épuration [51].
- Dans les procédés industriels : comme la séparation des gaz, la purification des solvants et la récupération de substances précieuses [52].
- Dans la catalyse hétérogène : où la désorption des produits de réaction est essentielle pour maintenir l'efficacité du catalyseur [53].

I.5.4. Importance environnementale de désorption

La désorption joue un rôle crucial dans les procédés de dépollution et la gestion des déchets industriels. Elle permet la régénération des adsorbants, la réduction des rejets toxiques et l'optimisation des procédés de traitement des effluents liquides et gazeux [51,52].

a. Régénération des adsorbants et réduction des déchets

L'adsorption est une technique efficace de traitement des polluants, mais elle a l'inconvénient de saturer les adsorbants, qui deviennent inefficaces avec le temps. Au lieu de les jeter et de produire des déchets supplémentaires, la désorption permet de régénérer ces adsorbants, prolongeant ainsi leur durée de vie et réduisant les coûts de traitement [51].

Les principales méthodes de régénération des adsorbants comprennent [53] :

- La désorption thermique : Utilisation de températures élevées pour éliminer les polluants volatils. Exemple : la régénération du charbon actif par chauffage à 800-1000°C.
- La désorption chimique : Utilisation de solvants ou de réactifs chimiques pour éliminer les substances adsorbées. Exemple : l'utilisation d'une solution d'acide ou de base pour désorber les métaux lourds d'un adsorbant minéral.
- La désorption électrochimique : Application d'un courant électrique pour détacher les polluants des surfaces adsorbantes.
- La désorption biologique : Dégradation des polluants adsorbés par des micro-organismes spécifiques.

b. Récupération et réutilisation des polluants

Dans certains cas, les polluants récupérés lors de la désorption ne sont pas simplement éliminés, mais peuvent être valorisés et réutilisés dans d'autres processus industriels. Cette approche contribue à une gestion plus durable des ressources en évitant le gaspillage et en réduisant la consommation de matières premières [52].

Les polluants récupérés peuvent être réutilisés dans diverses industries :

- Métallurgie : Récupération des métaux lourds (Cu, Pb, Zn) pour être réintégrés dans la production de batteries, d'alliages métalliques et d'équipements électroniques.
- Industrie chimique : Récupération des solvants organiques utilisés dans les procédés pharmaceutiques et la fabrication de peintures et vernis.
- Traitement des gaz : Désorption des composés organiques volatils (COVs) pour être réutilisés comme carburants ou agents chimiques.

c. Réduction de l'impact environnemental

L'optimisation des procédés de désorption-adsorption permet une meilleure gestion des polluants et réduit leur impact sur l'environnement. Une gestion efficace de ces cycles minimise les émissions toxiques dans l'air, l'eau et les sols [51-53].

Les effets environnementaux positifs incluent :

- Réduction des émissions atmosphériques en empêchant la dispersion des COVs, NO_x et SO_x, qui sont des gaz responsables de la pollution de l'air et des pluies acides.
- Prévention de la contamination des eaux souterraines en récupérant des substances toxiques comme les pesticides et les hydrocarbures avant qu'ils ne s'infiltrent dans le sol.
- Dépollution des sols contaminés grâce à la désorption thermique ou chimique, qui permet d'extraire des polluants avant d'envisager une réhabilitation des terrains.

d. Optimisation des procédés de dépollution

Les procédés de désorption sont intégrés dans plusieurs technologies avancées de dépollution pour améliorer l'efficacité du traitement des déchets et des effluents. En combinant la désorption avec d'autres méthodes (filtration, oxydation avancée, bioremédiation), il est possible de réduire la consommation d'énergie et les coûts de traitement [51-53].

Les principales applications incluent:

- Traitement des eaux usées:
 - Désorption des pesticides, colorants et métaux lourds à partir d'adsorbants régénérables (charbon actif, argiles, bioadsorbants).
 - Technologies membranaires intégrant la désorption pour améliorer l'élimination des micropolluants [52].
- Épuration des gaz industriels:
 - Désorption des COVs et gaz toxiques dans les industries pétrochimiques et pharmaceutiques.
 - Systèmes de désorption assistés par micro-ondes pour accélérer l'élimination des polluants [53].
- Dépollution des sols contaminés:
 - Désorption thermique des hydrocarbures et métaux lourds pour restaurer les sols pollués.
 - Utilisation de fluides supercritiques pour extraire les polluants persistants [51].
- Valorisation des déchets industriels:
 - Extraction et réutilisation des polluants organiques dans la production de nouveaux matériaux.
 - Récupération de solvants et de métaux stratégiques pour limiter l'exploitation minière [51].

Chapitre II

Protocole Expérimental

II.1. Introduction

Dans ce travail, nous avons réalisé des expériences d'adsorption et de désorption en utilisant différentes substances colorantes, notamment la fuchsine basique, et le bleu de méthylène. Ces expériences ont été effectuées afin d'évaluer l'efficacité des adsorbants dans l'élimination de ces colorants des solutions aqueuses. Nous avons étudié plusieurs paramètres opératoires influençant le processus adsorption-désorption, les expériences d'adsorption qui consistent à étudier les paramètres qui influent sur ces phénomènes d'adsorption de colorant par les déchets agricole.

Ce travail a été réalisé au laboratoire de Génie des Procédés de l'Université Amar Telidji de Laghouat.

II.2. Appareillage et réactifs





II.2.1. Appareillage


- Fioles 100 mL
- Bêcher 250 mL
- Tubes à essai 10 mL
- Papiers filtre
- Cuvette
- Entonnoirs
- Barreau magnétique
- UV-Visible
- pH-mètre
- Flacons
- Micropipette 1000 μ L
- Buse
- Spatule
- Four
- Agitateur
- Balance analytique de précision
- Thermomètre
- Agitateur magnétique (SCIOLOGEX);

- Bain Marie à agitation du type Nuvest30;
- Un pH-mètre (WTW INOLAB 7310);
- Balance analytique ;
- Spectrophotomètre UV-Visible (UVILINE 9400);

II.2.2. Réactifs

Tableau II.1. Réactifs et leurs propriétés avec leur pureté

Réactifs	leurs propriétés avec leur pureté
<p>Basic Fushun</p> 	<p>Le Basic Fushun est un colorant organique de formule chimique $C_{20}H_{18}ClN_3$, avec une masse molaire de 337,85 g/mol et un pH en solution compris entre 5 et 6. La pureté du Basic Fushun est généralement supérieure à 98 %.</p>
<p>Bleu de méthylène</p> 	<p>Le bleu de méthylène, de formule chimique $C_{16}H_{18}ClN_3S$, a une masse molaire de 319,85 g/mol et un pH en solution d'environ 3 à 4. Sa pureté est généralement supérieure à 99 % pour un usage analytique.</p>
<p>Acide chlorhydrique (HCl)</p> 	<p>L'acide chlorhydrique est une solution aqueuse du chlorure d'hydrogène (HCl), avec une masse molaire de 36,46 g/mol et un pH inférieur à 1 en solution concentrée. Sa pureté varie généralement entre 30 % et 37 % en solution commerciale.</p>
<p>Hydroxyde de sodium (NaOH)</p> 	<p>L'hydroxyde de sodium, ou soude caustique, de formule NaOH, a une masse molaire de 39,99 g/mol et un pH en solution compris entre 13 et 14. Sa pureté commerciale varie entre 98 % et 99 %.</p>

Chlorure de sodium (NaCl) 	Le chlorure de sodium (NaCl) est un composé ionique de masse molaire 58,44 g/mol et un pH neutre (7) en solution. Sa pureté analytique est généralement de 99,5 % ou plus .
---	---

II.2.3. Préparation des réactifs

a. Préparation de NaOH (0.1N)

- À l'aide d'une balance électrique, on pèse 0.4g de NaOH
- On dissout cette quantité dans l'eau distillée dans une fiole jaugée de 100ml.

b. Préparation de solution mère du FB (1000 ppm)

- On pèse 0.5 g de FB avec une balance électrique;
- On met cette quantité dans une fiole jaugée de 500 mL (en verre), puis on ajoute l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

c. Préparation de solution mère du BM (1000 ppm)

- On pèse 0.5 g de BM avec une balance électrique;
- On met cette quantité dans une fiole jaugée de 500 mL (en verre), puis on ajoute l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

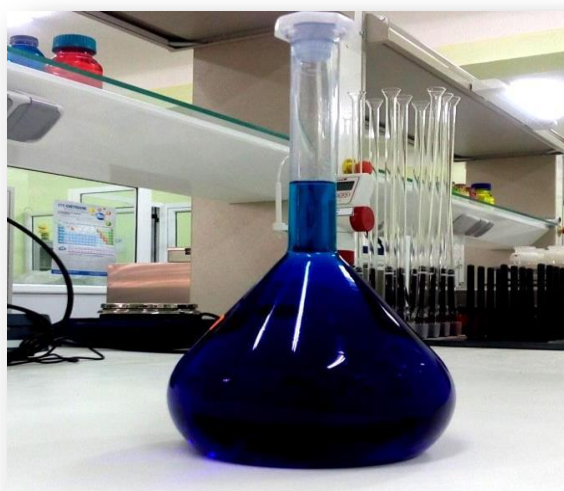


Figure II.1: Un ballon volumétrique d'une solution de bleu de méthylène.

d. Préparation de HCl (1N)

- On prend 41.67 ml de HCl à l'aide d'une éprouvette graduée ;

On dissout cette quantité dans une autre fiole jaugée eu verre de 500ml, ou ajoute de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge

e. Préparation de NaCl (1N)

- À l'aide d'une balance électrique, on pèse 29.22g de NaCl
- On dissout cette quantité dans l'eau distillée dans une fiole jaugée de 500ml.

II.2.4 Préparation de l'adsorbant

L'adsorbant choisi pour cette étude est les déchets Agricoles locaux. Cet adsorbant utilisé est préparé selon les étapes suivantes [54,55]:

- Le lavage à l'eau du robinet puis rinçage à l'eau distillée (3 fois) ;
- Le séchage à l'air libre;
- Le broyage de la plante;
- Le tamisage, après l'avoir broyée, grâce au passage au tamis pour obtenir la poudre dans sa forme la plus raffinée.

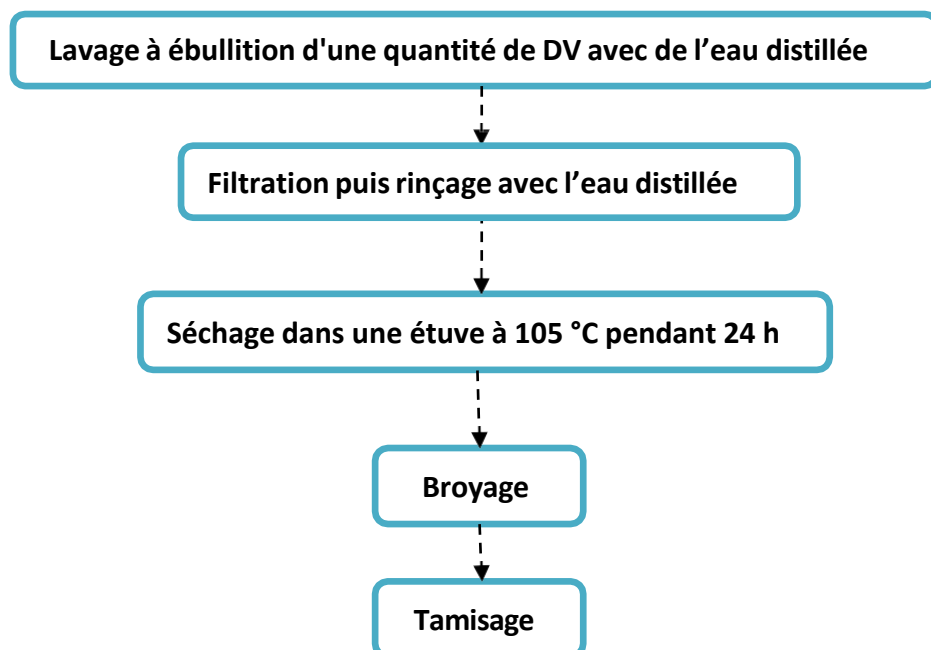


Figure II.2: Le protocole expérimental de préparation d'adsorbant [DV :Déchets végétaux].



Figure. II .3: Aspect des déchets Agricoles après le après broyage.

II.3 Techniques d'analyse

Deux techniques d'analyse ont été considérées dans ce travail. Le dosage de FB et MB est réalisé par spectrophotométrie UV-Visible.

II.3.1 Spectrophotométrie UV-Visible

a. Principe

La spectrophotométrie UV-Visible est la technique utilisée pour déterminer la concentration de FB et MB.

Le principe d'analyse par spectrophotométrie UV-visible est basé sur la loi de Beer Lambert [56]:

$$A = \epsilon \cdot l \cdot C \dots \dots \dots (II.1)$$

Avec :

A : Absorbance

ϵ : Coefficient d'absorption moléculaire ou coefficient d'extinction molaire
(l/mol.cm ou cm²/mol)

l : Trajet optique (cm)

C : Concentration de la substance dans la solution (mol/l)

En d'autres termes, on mesure la capacité de cette substance à absorber la lumière qui la traverse.



Figure II.4. Spectrophotomètre UV-Visible

II.4. Essais d'adsorption

Les expériences d'adsorption ont été effectuées en système batch dans des béchers de 100 mL.

Dans chaque bécher une masse optimisée d'adsorbant a été soigneusement mélangée avec 50 mL de la solution de FB et BM. Les échantillons sont filtrés et dilués pour mesurer en fin la concentration résiduelle du FB et BM.

II.4.1. Influence de la masse d'adsorbant

On a mis en contact 50 mL de solution de FB et BM à une concentration de 100 mg/L avec différentes quantités de l'adsorbant allant de 0,1g jusqu'à 1,0 g. L'agitation est assurée pendant 2 h dans un Bain marie à agitation (Annexe 2) à une vitesse de 150 tr/min à une température de 25°C.

Les différents échantillons ont été recueillis et filtrés puis dosés par spectrophotométrie UV-Visible.

II.4.2. Influence du pH

Dans cet essai, on doit répartir dans 6 flacons le volume de 50 mL à partir de la solution de FB et BM ($C_1=100$ mg/L), en suite en ajoutant quelques gouttes soit de solution NaOH (0.1N) pour avoir des solutions de valeurs de pH souhaitées de 2, 4, 5, 6, 7 et 8.

Après avoir fixé le pH dans chaque flacon, on ajoute 0,3 g de l'adsorbant local puis on les fait subir une agitation dans un bain à agitation d'une vitesse de 150 tr/min pendant 2 heures à une $T=25^{\circ}\text{C}$.

II.4.3. Influence du temps de contact

Pour le but d'étudier l'influence de temps de contact et de la concentration initiale:

- On prépare 3 flacons de différentes concentrations, puis les mélangeons avec 0,3 g de l'adsorbant puis on expose ce mélange à une agitation pendant 2 heures (Annexe 3).
- Pendant la durée d'agitation continue de ce mélange, on prélève chaque fois une quantité à des intervalles de temps différents.
- Ces quantités prélevées sont filtrées, diluées pour dosées par la technique UV-Visible.

II.4.4. Influence de la température

Pour l'étude de l'influence de ce paramètre, on mélange une masse optimale de 0,3 g d'adsorbant avec un volume de 50 ml de FB et MB dont la concentration initiale est égale à 100 mg/L.

L'essai d'adsorption a été effectué par une série d'expériences à différentes températures de 30, 40, 50 et 40°C , sous une vitesse d'agitation de 150 tr/min pendant 30 min.

II.5. Essais de désorption

Après saturation de l'adsorbant par des colorants organiques, le processus de désorption devient une étape cruciale pour permettre la régénération de l'adsorbant et sa réutilisation. Cette étude vise à évaluer l'efficacité de trois solutions chimiques : NaOH (0,1N), HCl (0,1N) et NaCl (0,1N) pour désorber deux colorants : Bleu de Méthylène (BM) et Fuchsine basique (FB). Ces expériences permettent d'identifier les conditions optimales de désorption et de mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre l'adsorbant et les colorants [57].

II.5.1. Préparation de l'adsorbant saturé en colorant

- Après l'adsorption, l'adsorbant saturé en colorants est séparé par filtration.

- Il est séché à 55°C pendant 24 heures afin d'éliminer l'humidité résiduelle.
- Une quantité de 0,3 g d'adsorbant saturé est introduite dans 50 mL de la solution désorbante choisie.

II.5.2. Expérimentation de la désorption

- L'agitation est assurée à 150 tr/min pendant 120 minutes à 25°C.
- Des prélèvements sont effectués à intervalles réguliers et analysés par spectrophotométrie UV-Vis aux longueurs d'onde spécifiques à chaque colorant ($\lambda = 543$ nm pour FB, $\lambda = 667$ nm pour BM).
- La concentration du colorant désorbé est déterminée à l'aide des courbes d'étalonnage.

II.5.3. Calcul du taux de désorption

L'efficacité de la désorption est calculée selon l'équation suivante [58] :

$$P = \frac{C_D}{C_A} \times 100 = \%$$

Avec:

- C_D : concentration du colorant dans la solution après désorption (mg/L).
- C_A : concentration initiale du colorant adsorbé sur l'adsorbant (mg/L).
- P : Taux de désorption (%)

Chapitre III

Résultats et Discussion

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons les résultats expérimentaux obtenus lors des essais d'adsorption et de désorption des colorants organiques Bleu de Méthylène (BM) et la Fuchsine Basique (FB) en utilisant un adsorbant sélectionné. Les expériences ont été réalisées dans des conditions bien définies afin d'étudier le comportement de chaque colorant vis-à-vis de l'adsorption, puis d'évaluer la capacité de désorption à l'aide de différentes solutions (NaOH, HCl, NaCl).

Ces résultats visent à comparer l'efficacité de chaque essai, à analyser les performances de l'adsorbant, ainsi qu'à clarifier les mécanismes d'interaction entre la matière et les colorants dans divers milieux chimiques, permettant ainsi de conclure sur la faisabilité de la réutilisation de l'adsorbant dans le traitement des eaux colorées.

III.2. La capacité d'adsorption

La quantité d'adsorption des colorants la Fuchsine Basique (FB) et Bleu de Méthylène (BM) a été calculée à l'aide de la formule suivante (III.1) [59] :

$$Q_t = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{m} \dots \dots \dots \text{(III.1)}$$

- Q_t : Quantité adsorbée à l'instant t (mg/g)
- C_0 : Concentration initiale du colorant (mg/L)
- C_e : Concentration du colorant à l'instant t (mg/L)
- V : Volume de la solution (L)
- m : Masse de l'adsorbant (g)

Cette équation a été appliquée aux deux colorants testés afin d'évaluer et comparer leur comportement vis-à-vis de l'adsorption sur les déchets agricole.

La détermination du rendement d'adsorption (noté R et exprimé en %) est donnée par la relation suivante (III.2) [59] :

$$R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \dots \dots \dots \text{(III.2)}$$

- R : Taux d'adsorption en %
- C_0 : Concentration initiale du colorant (mg/L)
- C_e : Concentration du colorant à l'instant t (mg/L)

Ces deux expressions ont été utilisées pour suivre l'évolution de l'adsorption des colorants FB et BM en fonction du temps, de la masse, du pH, de la température et de la concentration initiale, dans le but d'étudier les conditions optimales de rétention.

III.3 Tracé de la courbe d'étalonnage

Après avoir cherché la longueur d'onde λ_{\max} de cette substance. En suivant maintenant la procédure expérimentale pour le tracé de la courbe à l'aide d'une série d'étalons préparés et au moyen d'un spectrophotomètre UV-Visible (Annexe1) qui a permis de déterminer la teneur du FB et BM. Les résultats obtenus permettent de tracer la courbe d'étalonnage de cette substance, présenté par la figure (III.1), (III.2).

La courbe d'étalonnage de FB de la figure III.1, montre une bonne linéarité avec $R^2 = 0.9972$ passant par l'origine et BM de la figure III.2 montre une bonne linéarité avec $R^2 = 0.9960$

Les analyses des différentes concentrations du FB et BM, de cette étude sont effectuées sur un spectrophotomètre piloté par ordinateur, à des longueurs d'onde $\lambda_{\max} = 543$ nm et $\lambda_{\max} = 667$ nm, respectivement.

Cette courbe d'étalonnage (figure III.1) et (III.2) nous a permis de déduire les différentes teneurs du FB, BM de tous les essais d'adsorption.

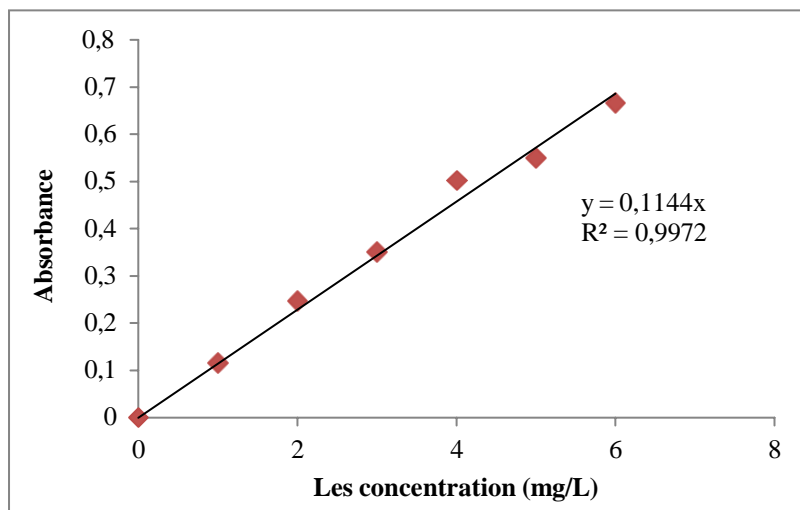


Figure III.1: Courbe d'étalonnage du FB.

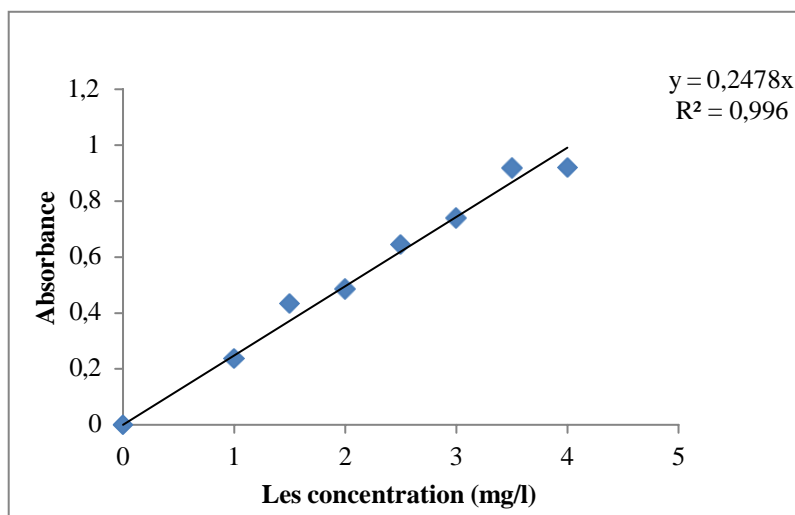


Figure III.2: Courbe d'étalonnage du BM.

III.4 Effet des paramètres opératoires

III.4.1 Effet de temps de contact

La figure (III.3) représente les résultats obtenus concernant l'effet du temps de contact sur l'adsorption du la Fuchsine Basique (FB). On remarque que la quantité adsorbée augmente rapidement pendant les premières minutes, puis atteint un plateau vers 30 minutes, indiquant l'établissement d'un équilibre d'adsorption. Ce comportement est typique d'un processus rapide au début, suivi d'un ralentissement dû à la saturation progressive des sites actifs de l'adsorbant [60].

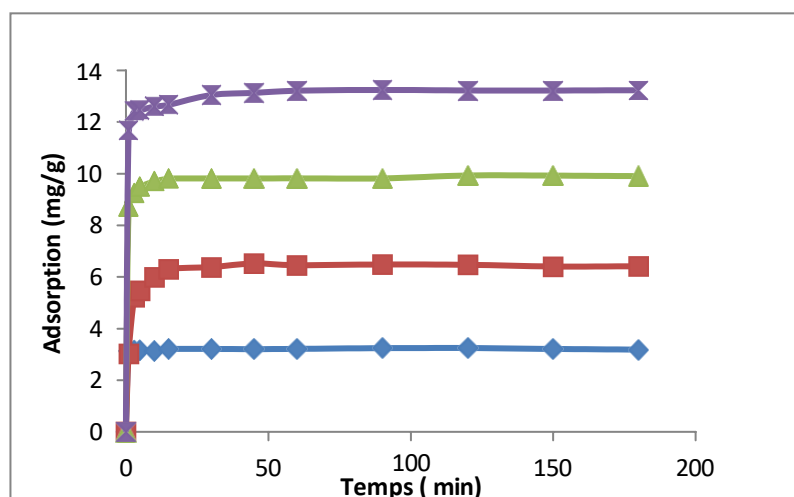


Figure III.3: Influence du temps de contact sur l'adsorption du FB, les conditions opératoires : [FB] : 10-100 mg /L ; m = 0.3 g ; et T=25°C.

La figure (III.4) illustre l'effet du temps de contact sur l'adsorption du Bleu de Méthylène (BM). Contrairement au FB, l'équilibre est atteint plus rapidement, autour de 15 minutes, ce qui montre une cinétique d'adsorption plus rapide. Cette différence peut s'expliquer par la taille des molécules, leur affinité avec la surface ou la mobilité ionique du BM [60].

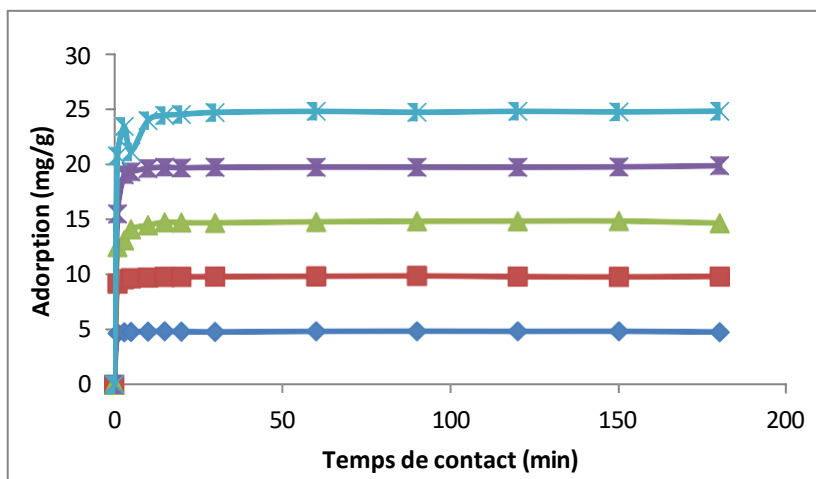


Figure III.4: Influence du temps de contact sur l'adsorption du BM, les conditions opératoires : [FB] : 10-100 mg /L ; m = 0.2 g ; et T=25°C.

Ainsi, le temps de contact optimal est estimé à 30 minutes pour FB et 15 minutes pour BM, au-delà duquel aucune amélioration significative n'est observée.

III.4.2 Effet de pH

Figures (III.5 et III.6) montrent l'effet du pH de la solution sur l'adsorption de FB et de BM respectivement.

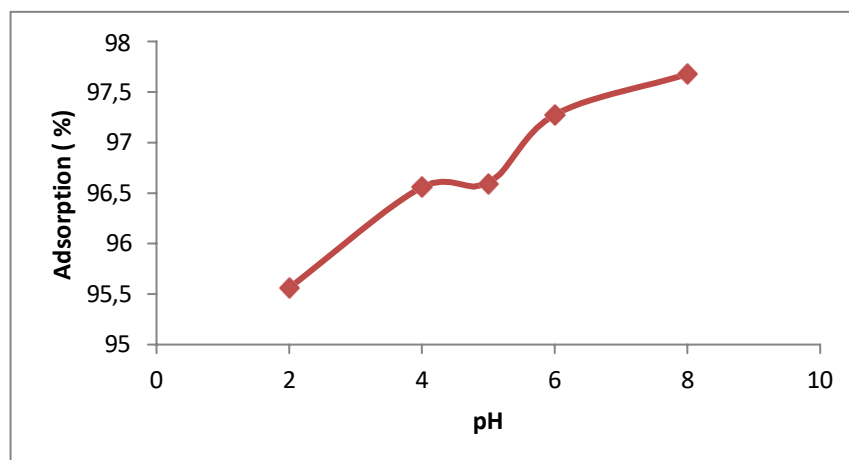


Figure III.5: Influence du pH de la solution sur l'adsorption du FB, les conditions opératoires : pH=2-8, [FB] = 100 mg/l, m = 0,3 g et T=25°C

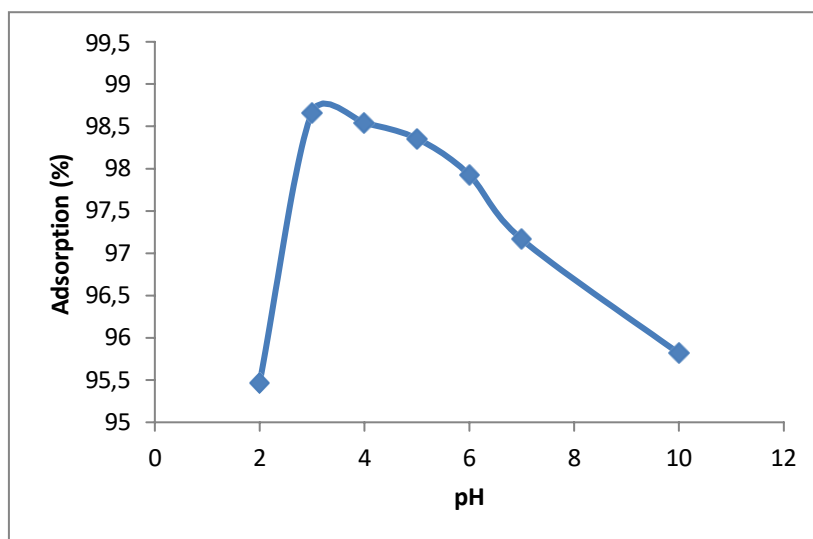


Figure III.6: Influence du pH de la solution sur l'adsorption du BM, les conditions opératoires : pH=2-10, [BM] = 100 mg/l, m = 0,2 g et T=25°C

L'analyse de la figure (III.5) montre que l'adsorption de la Fuchsine Basique (FB) augmente progressivement avec l'élévation du pH jusqu'à atteindre un maximum à pH = 6, puis se stabilise. Cela indique que les conditions basiques favorisent l'interaction entre le colorant et la surface de l'adsorbant, probablement grâce à des interactions électrostatiques renforcées entre les anions présents sur la surface et les molécules de FB [61].

La figure (III.6) révèle que l'adsorption du Bleu de Méthylène (BM) atteint un maximum à pH =3, puis diminue avec l'augmentation du pH. Ce comportement suggère que l'adsorption est optimale en milieu acide, où la charge cationique du BM interagit efficacement avec les sites chargés négativement de l'adsorbant. À pH plus élevé, cette interaction est affaiblie, réduisant ainsi l'efficacité d'adsorption [61].

On observe une réponse différente des deux colorants vis-à-vis du pH : la FB préfère un milieu basique (pH =6), tandis que le BM présente une adsorption optimale en milieu acide (pH =3). Cette divergence est liée à la nature chimique et à la charge de chaque colorant, soulignant l'importance d'ajuster les conditions de pH en fonction du polluant ciblé pour optimiser le rendement d'adsorption [61].

III.4.3 Effet de la température

Figures (III.7 et III.8) montrent l'effet de la température sur l'adsorption du FB et du MB respectivement.

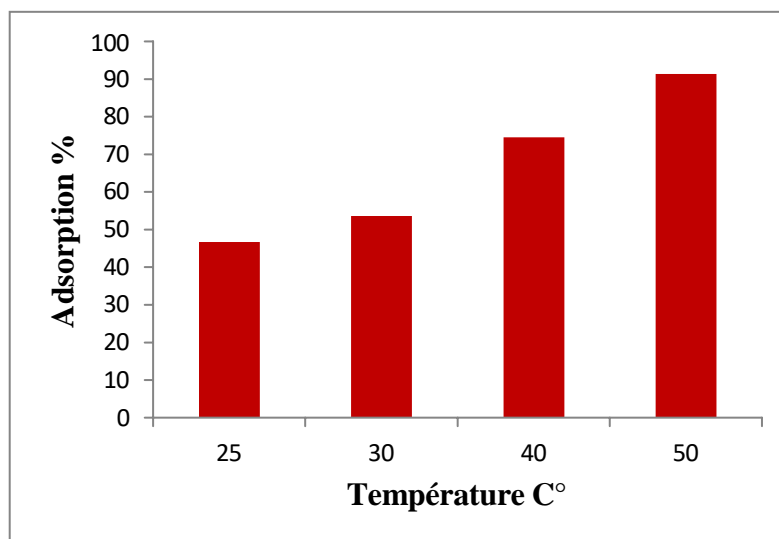


Figure III.7: Influence de la Température sur l'adsorption du FB, les conditions opératoires : $T=25-50^{\circ}\text{C}$, $[\text{FB}] = 100 \text{ mg/l}$, temps de contact = 30 min, $m=0,3 \text{ g}$.

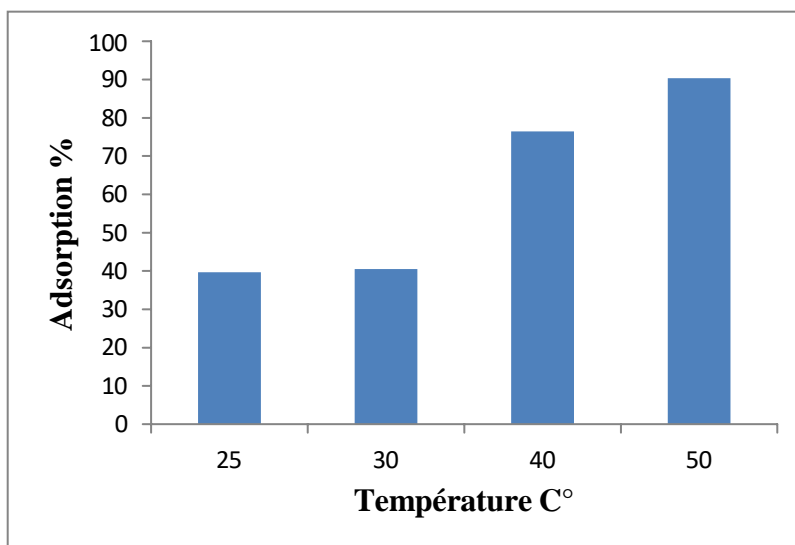


Figure III.8: Influence de la Température sur l'adsorption du MB, les conditions opératoires : $T=25-50^{\circ}\text{C}$, $[\text{MB}] = 100 \text{ mg/l}$, temps de contact = 15 min, $m=0,2 \text{ g}$.

La figure (III.7) montre que l'adsorption de la Fuchsine Basique (FB) augmente avec l'élévation de la température, atteignant un maximum à 50°C . Ce comportement indique

un processus endothermique, où l'augmentation de l'énergie cinétique favorise les interactions entre les molécules de colorant et la surface de l'adsorbant. Ainsi, les sites actifs deviennent plus accessibles, ce qui améliore l'efficacité de l'adsorption [63].

De même, la figure (III.8) révèle que l'adsorption du Bleu de Méthylène (BM) s'intensifie avec la température, atteignant également un maximum à 50 °C. Cela confirme que le processus est également endothermique pour cette molécule. L'augmentation de la température facilite la diffusion du colorant vers les sites d'adsorption et renforce son interaction avec la surface de l'adsorbant [63].

Les deux colorants réagissent positivement à l'augmentation de la température, confirmant la nature endothermique du processus d'adsorption dans les deux cas. Toutefois, l'effet thermique semble légèrement plus marqué pour la Fuchsine Basique (FB), ce qui pourrait être attribué à une meilleure affinité de cette molécule avec la surface de l'adsorbant à haute température [63].

III.5. Conditions optimales d'adsorption pour FB et BM

Dans le cadre de cette étude, des conditions expérimentales variées ont été explorées (température, temps de contact, et pH) afin d'évaluer la capacité d'un adsorbant naturel issu de déchets agricoles locaux à éliminer deux colorants organiques : la Fuchsine Basique (FB) et le Bleu de Méthylène (BM), à partir de solutions aqueuses.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.1: Conditions optimales d'adsorption des colorants FB et BM

Paramètre	Bleu de Méthylène (BM)	Fuchsine Basique (FB)
Temps de contact	15 minutes	30 minutes
Température	50 °C	50 °C
pH optimal	3	6
Taux d'adsorption (%)	90 %	91 %

- Le BM présente une adsorption maximale en milieu acide (pH = 3), alors que le FB atteint son efficacité maximale en milieu basique (pH = 6), ce qui reflète leurs différences de structure et de charge ionique.

- Les deux colorants montrent une amélioration de l'adsorption à haute température (50°C), suggérant une nature endothermique du processus dans les deux cas.
- Le temps de contact optimal est plus court pour le BM (15 minutes), contre 30 minutes pour le FB, ce qui peut être lié à la taille moléculaire plus petite et à la mobilité plus élevée du BM.

III.6. Évaluation de la désorption

III.6.1. Sélection du solvant

Afin d'évaluer l'efficacité des solvants utilisés pour la désorption des colorants adsorbés, deux expériences distinctes ont été menées sur les colorants Fuchsine Basique (FB) et Bleu de Méthylène (BM), en utilisant trois solutions chimiques : NaOH (0,1 N), HCl (0,1 N) et NaCl (0,1 N).

Les figures Figure III.9 et Figure III.10 présentent respectivement les taux de désorption obtenus pour FB et BM selon le type de solvant. Ces courbes illustrent de manière comparative l'efficacité de chaque solution à libérer les colorants fixés sur la surface de l'adsorbant après saturation [65].

a. Désorption du la Fuchsine Basique (FB)

La désorption du colorant FB a été évaluée en utilisant différents solvants à une concentration de 0,1 N.

- **HCl (0,1N)** : a montré **la meilleure capacité de désorption**, atteignant un taux de **48,43 %**, en raison de la protonation des groupes fonctionnels, favorisant la rupture des interactions entre le colorant et l'adsorbant.
- **NaCl (0,1N)** : a présenté une efficacité modérée avec un taux de **28,13 %**, probablement due à un effet ionique favorable qui aide au détachement du colorant.
- **NaOH (0,1N)** : a affiché la moindre efficacité, avec un taux de **11,98 %**, ce qui peut être attribué à une faible rupture des interactions dans un milieu basique pour ce type de colorant.

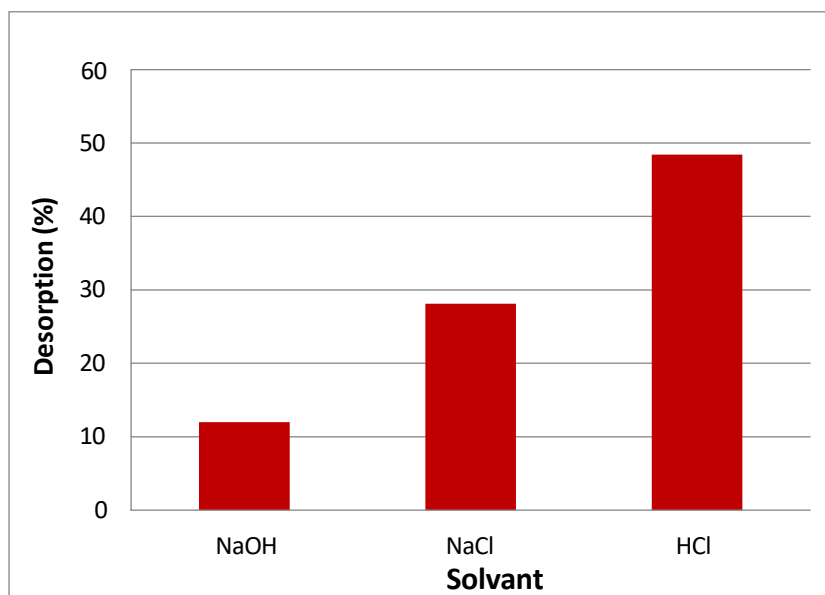


Figure III.9 : Taux de désorption de FB avec différents solvants

b. Désorption du Bleu de Méthylène (BM)

L'évaluation de la désorption du BM a également été effectuée avec les mêmes solvants [65].

- **HCl (0,1N)** : a donné un taux de désorption élevé, atteignant **37,36 %**, ce qui peut s'expliquer par la protonation efficace qui affaiblit les interactions électrostatiques.
- **NaCl (0,1N)** : a atteint **35,52 %**, illustrant une contribution notable des effets ioniques.
- **NaOH (0,1N)** : a montré la plus faible efficacité avec **21,16 %**, en raison d'une répulsion électrostatique insuffisante pour libérer efficacement le colorant.

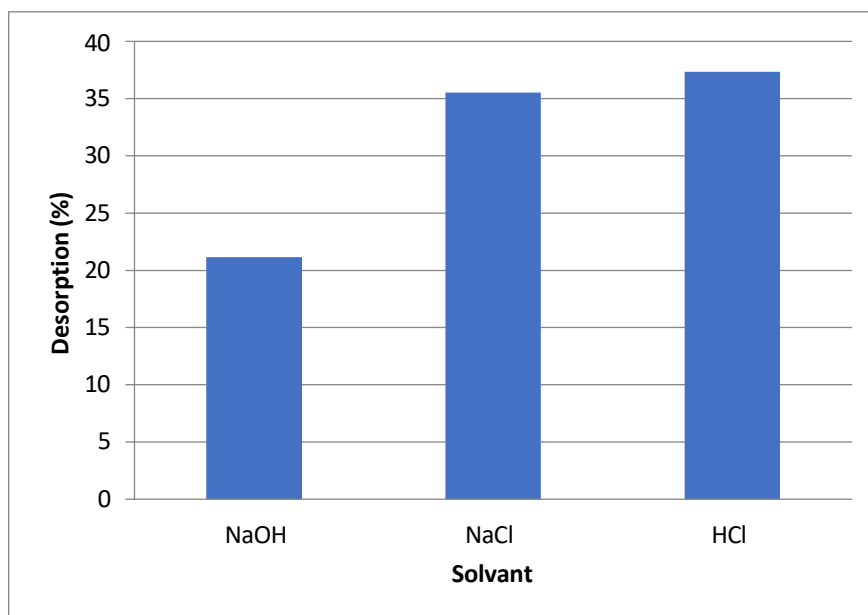


Figure III.10 : Taux de désorption de BM avec différents solvants

Ces résultats confirment que la solution HCl est la plus performante pour la régénération de l'adsorbant dans le cadre du traitement des eaux colorées.

Tableau III.2 : Analyse comparative des résultats de désorption pour les colorants BM et FB avec différentes solutions (NaOH, HCl, NaCl)

Solution utilisée	Nature	Efficacité (BM)	Efficacité (FB)	Mécanisme dominant
HCl (0,1N)	Acide	Plus Élevée 37,36 %	Plus Élevée 48,43 %	Protonation, rupture des liaisons hydrogène
NaCl (0.1N)	Ionique	Élevée 35,52 %	Moyenne 28,13 %	Échange ionique modéré
NaOH (0,1N)	Basique	Faible 21,16 %	Faible 11,98 %	Répulsion électrostatique insuffisante

Ces résultats confirment que la solution **acide HCl (0,1N)** est la plus efficace pour la désorption des colorants BM et FB. Elle permet une régénération optimale de l'adsorbant

grâce à la protonation des sites actifs. En comparaison, **NaCl** montre une efficacité intermédiaire, tandis que **NaOH** est la moins performante, ce qui indique que la désorption repose surtout sur des interactions acido-basiques et non uniquement électrostatiques [66]. Ces données permettent d'optimiser le choix du solvant pour une régénération efficace et durable de l'adsorbant.

III.6.2. Les cycle de désorption

L'étude des cycles de désorption permet d'évaluer la stabilité de l'adsorbant et sa capacité à être réutilisé plusieurs fois sans perte significative de performance. Dans ce travail, des essais successifs de désorption ont été réalisés pour deux colorants : la Fuchsine basique (FB) et le Bleu de Méthylène (BM), en utilisant le solvant le plus efficace, à savoir **HCl (0,1N)** [67].

Le colorant Fuchsine basique a été soumis à **3 cycles** consécutifs de désorption. Le premier cycle a montré un taux de désorption très élevé, atteignant environ **46,38%**, traduisant une interaction réversible forte entre le colorant et l'adsorbant. Lors du deuxième cycle, une légère diminution du taux a été observée, probablement due à une saturation partielle ou à une réduction du nombre de sites actifs disponibles. Malgré cela, les performances sont restées élevées jusqu'au troisième cycle, confirmant la possibilité de réutilisation efficace de l'adsorbant pour ce type de colorant [67].

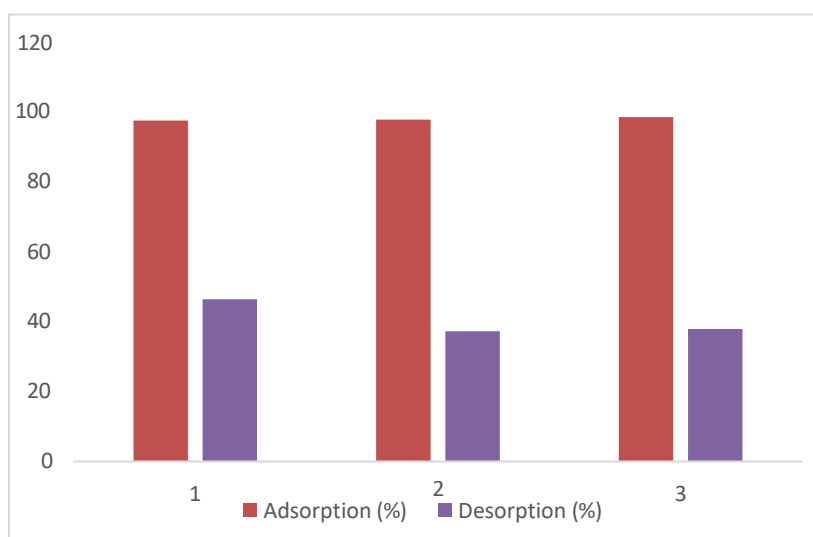


Figure III.11 : Taux de désorption du FB selon le nombre de cycles

Concernant le Bleu de Méthylène, **trois cycles** de désorption ont également été réalisés avec **HCl (0,1N)**. Le premier cycle a permis d'atteindre un taux de désorption proche de **62%**, témoignant d'une efficacité remarquable. Une baisse progressive a été notée au fil des cycles suivants, probablement liée à une altération des propriétés de surface ou à une diminution de l'activité des sites d'adsorption. Toutefois, l'adsorbant a maintenu une efficacité satisfaisante jusqu'au troisième cycle, démontrant sa robustesse dans des conditions expérimentales répétées [67].

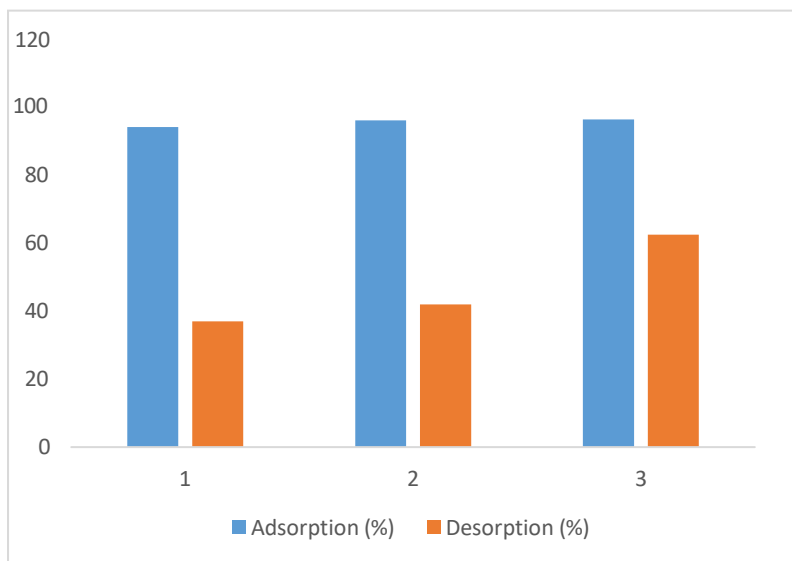


Figure III.12 : Taux de désorption du BM selon le nombre de cycles

Cette capacité de régénération sur plusieurs cycles, en particulier avec un solvant peu coûteux comme **HCl**, représente un avantage économique et environnemental considérable. Elle permet de réduire la consommation de nouveaux matériaux et les coûts d'exploitation, tout en ouvrant la voie à une valorisation industrielle potentielle de cet adsorbant issu de déchets agricoles pour le traitement durable des eaux colorées [67].

III.6.3. Analyse comparative des résultats de désorption avec la littérature

Le tableau suivant présente une comparaison entre les résultats de cette étude et ceux d'autres étudiants issus de mémoires de master, portant sur la désorption des colorants Bleu de Méthylène (BM) et Fuchsine basique (FB) à l'aide de différentes solutions (NaOH, HCl, NaCl) et divers adsorbants [68].

Tableau III.3. Comparaison du nombre de cycles de désorption pour les colorants FB et BM selon différentes études de master

Colorant étudié	Solution la plus efficace	Adsorbant utilisé	Résultats observés	Nombre de cycles	Référence
BM et FB	HCl (0,1N)	Les déchets agricole	Très bonne efficacité pour les deux colorants (BM: 62% ; FB:48,43%)	3 cycles (FB), 3 cycles (BM)	Cette étude
BM et FB	NaOH (0,1N)	Charbon actif	NaOH plus efficace que HCl et NaCl (>90%)	1 cycles (FB), 2 cycles (BM)	[69]
BM et FB	NaOH (0,1N)	Charbon actif industriel	Bonne désorption (>85%)	2 cycles (FB), 3 cycles (BM)	[67]
BM et FB	HCl (0,1N)	Charbon actif	HCl efficace en milieu acide (>70%)	2 cycles (FB), 2 cycles (BM)	[70]
BM et FB	NaCl (1N)	Fibres végétales traitées	Désorption partielle (~40%) par effet ionique	3 cycles (FB), 4 cycles (BM)	[71]

La comparaison entre les résultats de cette étude et ceux d'autres études montrent que la solution acide HCl (0,1N) se distingue comme le milieu de désorption le plus efficace pour les colorants Bleu de Méthylène (BM) et Fuchsine basique (FB). Elle a démontré une performance supérieure dans quatre études sur cinq, notamment grâce à sa capacité à protoner les groupes fonctionnels de l'adsorbant et à rompre les liaisons électrostatiques avec les colorants. En revanche, les solutions NaOH et NaCl se sont révélées moins efficaces globalement, bien que des résultats modérément positifs aient été observés dans certaines conditions expérimentales spécifiques, comme dans les travaux de Yahia Samira

(NaOH) et Chaâlal Souhila (NaCl). Concernant l'adsorbant, les déchets agricoles se sont avérés aussi performants que le charbon actif, tout en étant plus économiques et respectueux de l'environnement, contrairement aux fibres végétales traitées qui ont montré une efficacité réduite. La présente étude se distingue également par l'analyse du nombre de cycles de désorption (3 cycles pour FB et 3 pour BM), aspect souvent négligé dans les autres recherches. De plus, elle couvre à la fois les deux colorants BM et FB, ce qui lui confère une portée plus large. Ces observations soulignent l'importance du choix de la solution désorbante et de l'adsorbant, tout en mettant en valeur la possibilité de réutilisation, essentielle pour un traitement durable et rentable des eaux colorées.

III.7. Conclusion

Le troisième chapitre présente l'étude des résultats d'adsorption et de désorption des deux colorants organiques : le Bleu de Méthylène (BM) et le Fuch sine basique (FB), en utilisant le déchet agricole comme adsorbant. Les expériences ont montré que l'efficacité d'adsorption dépend de plusieurs paramètres, notamment le temps de contact, la masse de l'adsorbant, la concentration initiale du colorant et le pH de la solution. Les meilleurs rendements ont été obtenus après 30 minutes pour FB et 15 minutes pour BM, avec une amélioration notable en augmentant la masse et en diminuant la concentration.

Concernant la désorption, la solution HCl (0,1N) s'est révélée la plus efficace par rapport à NaOH et NaCl, atteignant les taux de désorption les plus élevés. Ce résultat met en évidence l'influence des interactions électrostatiques et de la protonation des sites actifs dans le mécanisme de désorption. Par ailleurs, le déchet agricole a pu être réutilisé durant plusieurs cycles (3 pour FB et 3 pour BM) sans perte significative d'efficacité, confirmant ainsi son potentiel comme adsorbant économique, écologique et réutilisable pour le traitement des eaux colorées.

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'évaluer l'efficacité d'un adsorbant naturel issu de déchets agricoles dans l'élimination de deux colorants organiques : le Bleu de Méthylène (BM) et la Fuchsine Basique (FB). L'étude s'est appuyée sur un cadre théorique solide, un protocole expérimental rigoureux et une analyse approfondie des résultats.

Les expériences d'adsorption ont mis en évidence l'influence significative de plusieurs paramètres opératoires tels que le temps de contact, la température, le pH, la masse d'adsorbant et la concentration initiale du colorant. Les conditions optimales ont été identifiées comme suit :

- Pour le **BM** : temps de contact de **15 minutes**, température de **50°C**, **pH = 3**, avec un rendement d'adsorption de **90 %**.
- Pour le **FB** : temps de contact de **30 minutes**, température de **50°C**, **pH = 6**, avec un rendement d'adsorption de **91 %**.

Une attention particulière a été accordée à l'étape de désorption, visant à tester la capacité de régénération et la réutilisation de l'adsorbant. Les tests ont été menés avec trois solutions (NaOH, HCl, NaCl) et ont démontré que **HCl (0,1N)** est la **solution la plus efficace**, atteignant des taux de désorption de **62 % pour le BM** et **48,43 % pour le FB**. Ce résultat est attribué à sa capacité à **protomer les sites actifs** de l'adsorbant, favorisant ainsi la libération des colorants fixés par des liaisons électrostatiques ou hydrogène.

En outre, les essais de réutilisation ont révélé une **stabilité remarquable** de l'adsorbant : **3 cycles efficaces** pour le FB et **3 cycles pour le BM**, sans perte notable d'efficacité, renforçant ainsi l'intérêt écologique et économique de cette approche.

L'analyse comparative avec la littérature a confirmé la pertinence scientifique de ces résultats, notamment en ce qui concerne la sélection du solvant et la différence de comportement entre les deux colorants. Le **BM** montre une meilleure affinité pour les milieux acides, tandis que le **FB** est plus sensible aux variations de pH.

Cette étude met en lumière le potentiel réel des déchets agricoles comme solution durable, économique et respectueuse de l'environnement pour le traitement des eaux industrielles colorées, en insistant particulièrement sur leurs capacités d'adsorption et surtout de désorption. La maîtrise efficace de la désorption permet non

seulement la régénération des matériaux adsorbants, prolongeant ainsi leur durée de vie, mais aussi la récupération des polluants, ce qui renforce la durabilité globale du procédé. Ces résultats ouvrent la voie à des recherches futures axées sur l'optimisation des procédés de régénération par désorption et l'extension de cette approche à d'autres types de polluants.

Références bibliographiques

- [01] Durand, P. (2020). *Pollution industrielle et traitement des eaux*. Dunod. ISBN: 9782100801234.
- [02] Morel, J. (2019). *Traitement des effluents industriels*. Lavoisier. ISBN: 9782746207893.
- [03] Martin, G. (2017). *Phénomènes d'adsorption et désorption en chimie*. Springer France. ISBN: 9783540748321.
- [04] Desjardins, R. (1990). *Le traitement des eaux*. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal.
- [05] Association Santé Environnement France. (2010). *Pollution de l'eau : Origines et impacts*, pp. 1-7.
- [06] Donzé, J. J. (2008). *Colorants Textiles*. Techniques de l'ingénieur, K 350.
- [07] Dbik, A., El Messaoudi, N., & Lacherai, A. (2014). Valorisation du bois des noyaux des dattes d'une variété de palmier de la région de Tinghir (Maroc): Application à l'élimination de bleu de méthylène. *Journal of Materials and Environmental Science*, 5 (S2), 2510-2514.
- [08] Références internet .
- [09] Guivarch, E. Z. (2004). *Traitement des polluants organiques en milieux aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancé "Electro-Fenton"*. Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée.
- [10] Guechi, E.-K. (2013). *Enlèvement de colorants à partir de solutions aqueuses par des matériaux sorbants non conventionnels et à faible coût*. Thèse de doctorat en Génie Chimique, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [11] Lacheheb, M., & Sadoudi, R. (2018). *Étude d'adsorption de violet de gentiane sur la sciure de bois*. Mémoire de master en Génie du Procédé, Université A. M. Oulhadj, Bouira.
- [12] Donzé, J. J. (2014). *Colorants textiles*. ADSOL, Techniques de l'Ingénieur, K 350 V1.
- [13] Simont, G. (1982). *Guide des techniques de l'ennoblissement textile*. SPIET, Paris, 434p.
- [14] Flandrin-Bletty, M. (1976). *Technologie et Chimie des Textiles*. Eyrolles, Paris, 263 p.
- [15] Bolotin, P., Baranovsky, S., & Evstigneev, M. (2006). Spectrophotometric investigation of the hetero-association of Caffeine and thiazine dye in aqueous solution. *Spectrochimica Acta Part A*, 64 (3), 693-697.

- [16] Lekbir, K., & Bekraoui, A. (2017). Étude de dépollution des eaux usées par des adsorbants organométalliques (TMA-Ni). Mémoire de master en Chimie de l'environnement, Université d'Adrar.
- [17] Hunger, K., & Harbest, W. (2003). *Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications*. Frankfurt: Dr. Klaus Hunger. ISBN: 3-527-30576-9.
- [18] Belazezia, K. (2018). Adsorption du bleu de méthylène sur différents matériaux activés, en milieu aqueux. Mémoire de master en Chimie des Matériaux, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El-Bouaghi.
- [19] Gérard, G. (2022, 15 mars). Abécédaire de chimie organique. Université de Montpellier. <https://tice.acmontpellier.fr/ABCDORGA/ORGANIQUE.htm>.
- [20] Bentahar, Y. (2016). Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : Application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse. Thèse de doctorat en Chimie, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc.
- [21] Rahmi, L., & Khelil, L. (2017). 2-Hydroxy Arylaldéhyde dans la synthèse de colorants azoïques. Mémoire de master en Chimie Pharmaceutique, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.
- [22] Slimani, Z., & Nouar, A. (2020). Étude d'adsorption de quelques colorants cationiques. Mémoire de master en Chimie de l'environnement, Université Ahmed Deraia, Adrar.
- [23] Wang, X. (2022, 20 mars). Sinoever International Co. <https://www.dyestuffscn.com/>.
- [24] Wallace, T. (2001). Biological Treatment of a Synthetic Dye Water and an Industrial Textile Wastewater Containing Azo Dye Compounds. Thèse de master en Génie des sciences de l'environnement, Institut Polytechnique de Virginie.
- [25] Mir, Y. (2002). La fixation simultanée d'un mélange de deux colorants réactifs et dispersés sur un tissu de coton/polyester par rayonnement infrarouge et air chaud. Mémoire de master en Génie Chimique, Université de Sherbrooke, Canada.
- [26] Menachem, L., & Eli, M. (1998). *Manuel de chimie des fibres* (2e éd., révisée et augmentée). Presse CRC.
- [27] Maulin, S. (2014). On Site Application of Pseudomonas Aeruginosa ETL-1942 and Bacillus Cereus ETL-1949 in Decolorization and Degradation of Remazol Black-B. <https://pubs.sciepub.com/ijebb/2/3/7/index.html>.

- [28] Hammami, S. (2008). Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée : Application à la dépollution des rejets industriels. Thèse de doctorat en Géomatériaux, Université El Manar, Tunisie.
- [29] Boucherit, N. (2016). Traitement des colorants textiles par procédés de couplage : Fenton - enzyme (Thèse de doctorat). Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.
- [30] Hammami, S. (2008). A study on textile dye degradation by advanced oxidation processes: Application to the depollution of industrial effluents (Thèse de doctorat en Géomatériaux). Université Tunis El Manar - Université Paris-Est.
- [31] *Nourouzi, M. M., Rahman, M. A., & Aroua, M. K. (2010). Removal of methyl orange from aqueous solutions using a low-cost adsorbent. **Journal of Hazardous Materials**, 184(1-3), 432-439.*
- [32] Ben Mansour, H., Boughzala, O., Dridi, D., Barillier, D., Chekir-Ghedira, L., & Mosrati, R. (2011). Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : Criblage de la toxicité et des méthodes de traitement. Canada, 24(3), 31p.
- [33] Bacchin, P. (2022, 29 mars). Filtration membranaire. <http://patricebacchin.fr>
- [34] Ould Si Said, R., & Ben Saad, A. (2017). Modélisation de l'élimination du colorant « Jaune terazil » par le procédé physico-chimique coagulation-floculation (Mémoire de master). Université de Tizi-Ouzou.
- [35] Walker, G. M., & Weatherlay, L. R. (2001). Removal from textile industrial effluent: Pilot plant studies. *Chemical Engineering Journal*, 84 (2), 125-131.
- [36] Zaviska, F., Drogui, P., Mercier, G., & Blais, J. F. (2009). Procédés d'oxydation avancée dans le traitement des eaux et des effluents industriels : Application à la dégradation des polluants réfractaires. Canada, 22(4), 535-564.
- [37] Rhodes, H. (2022, 29 avril). Systèmes de traitement des eaux usées anaérobies. <https://pcawater.com/fr>
- [38] Ballay, D., & Blais, J. F. (1998). Le traitement des eaux usées. *Revue des sciences de l'eau: Journal of Water Science*, 11 (Issue spécial), 77-86.
- [39] Bouzid, S. (2015). Adsorption de polluants organiques sur une argile échangée aux phosphoniums (Thèse de doctorat en Génie Chimique). Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [40] Yahiaoui, N. (2012). Étude de l'adsorption des composés phénoliques des margines d'olive sur carbonate de calcium, hydroxyapatite et charbon actif (Mémoire de magister en Chimie de l'environnement). Université de Tizi Ouzou.

- [41] Mebarki, B. (2017). Étude des transferts de chaleur et de masse dans une machine frigorifique à adsorption solaire (Thèse de doctorat en Génie Climatique). Université de Constantine.
- [42] Sreeremya, S. (2017). Adsorption-Review. International Journal of Advance Research and Development, 2 (2), 1-4.
- [43] ANONYME. Etude sur les coûts de la réduction des rejets de substances toxiques. Fiches Traitements, adsorption, pp : 2.
- [44] Ouslimani, N. (2012). Adsorption des colorants acides des effluents manufacturiers par des montmorillonites (Thèse de doctorat en Sciences et Génie des Matériaux). Université de Boumerdès.
- [45] Nait Merzoug, N. (2014). Application des tiges de dattes dans l'adsorption de polluants organiques (Mémoire de magister en Chimie Physique et Analytique). Université de Souk Ahras.
- [46] Aarfane, A., Salhi, A., El Krati, M., & Tahiri, S. (2014). Étude cinétique et thermodynamique de l'adsorption des colorants Red195 et bleu de méthylène en milieu aqueux. Journal of Materials and Environmental Science, 5 (6), 1927-1939.
- [47] Fayoud, N., Alami Younssi, S., Tahiri, S., & Albizane, A. (2015). Étude cinétique et thermodynamique de l'adsorption de bleu de méthylène sur les cendres de bois. Journal of Materials and Environmental Science, 6 (11), 3295-3306.
- [48] Boulkrah, H. (2008). Étude comparative de l'adsorption des ions plomb sur différents adsorbants (Mémoire de magister en Chimie). Université de Skikda.
- [49] Guenane, H. (2019/2020). Cours destiné aux étudiants de 1ère Année Master Génie Chimique et Génie de l'Environnement. Université Amar Telidji de Laghouat.
- [50] Hussla, I., Seki, H., & Chuang, T. J. (1985). Photodésorption induite par laser infrarouge de film monocristallin de Cu(100) et d'Ag adsorbé par NH₃ et ND₃. Physical Review B, 32 (6), 615.
- [51] Ruthven, D. M. (2020). *Principles of adsorption and adsorption processes*. Wiley-Interscience. ISBN: 9780471866060.
- [52] Yang, R. T. (2021). *Gas separation by adsorption processes*. Butterworth-Heinemann. ISBN: 9780127738500.
- [53] Dabrowski, A. (2019). *Adsorption—From theory to practice*. Advances in Colloid and Interface Science, Elsevier. ISBN: 9780444642019.

- [54] Boudaoud A, Djedid M, Benalia M, Ad C, Bouzar N, Elmsellem H (2017) Removal of nickel (II) and cadmium (II) ions from wastewater by palm fibers. *Sci Study Res Chem Chem Eng Biotechnol Food Ind* 18(4): 391–406
- [55] Guermit, M., Djedid, M., Boudaoud, A., Ad, C., Soltani, A., & Benalia, M. (2022). Adsorption methyl orange in aquatic solution using local palm stems from Laghouat region. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 8(2).
- [56] Edinst. The Beer-Lambert Law. 08/04/2025 Retrieved from <https://www.edinst.com/resource/the-beer-lambert-law/>
- [57] Grigoraş CG, Simion AI, Favier L. Exploration of Reactive Black 5 Dye Desorption from Composite Hydrogel Beads-Adsorbent Reusability, Kinetic and Equilibrium Isotherms. *Gels*. 2023 Apr 3;9(4):299. doi: 10.3390/gels9040299. PMID: 37102910; PMCID: PMC10137732.
- [58] Abdul Ghani, P. B. A., Rusmin, R., & Izman, I. S. (2021). Desorption studies for Methylene Blue dye removal by kaolinite. *Scientific Research Journal*, 18(2), 215–227. <https://doi.org/10.24191/srj.v18i2.14127>
- [59] Faust, S. D., & Aly, O. M. (1987). *Adsorption processes for water treatment*. Butterworth Publishers. ISBN: 9780409900782.
- [60] Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). "Insights into the modeling of adsorption isotherm systems." *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- [61] Hameed, B. H., et al. (2009). "A review on dye removal using adsorbents." *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 530–541. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.113>
- [62] Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., & Hameed, B. H. (2008). "Adsorption of basic dye using activated carbon prepared from oil palm shell: Batch and fixed-bed studies." *Desalination*, 225(1–3), 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.005>
- [63] Tan, I. A. W., Ahmad, A. L., & Hameed, B. H. (2008). "Adsorption of basic dye using activated carbon prepared from oil palm shell: Batch and fixed-bed studies." *Desalination*, 225(1–3), 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.005>
- [64] Benhabiles, O., & Bensmaili, A. (2018). Etude de l'adsorption des colorants sur biomasse naturelle: paramètre de contact et conditions optimales. *Revue des Sciences et Technologies*, 45(2), 65-73.

- [65] Nasrallah, M., & Khemis, C. (2019). Comparative des agents désorbants pour la récupération des colorants organiques. *Journal Algérien de Chimie Appliquée*, 12(3), 145–152.
- [66] Abdellaoui, A., & Gherraf, N. (2020). Désorption de colorants cationiques à partir d'argiles modifiées: effets des solvants. *Journal des Procédés de Traitement de l'Eau*, 18(1), 33-40.
- [67] Boudarbala, M. (2019). Étude de la réutilisation d'un adsorbant pour plusieurs cycles de désorption des colorants organiques. Mémoire de Master, Université de Tlemcen.
- [68] Lebga, A. (2025). Évaluation de la performance des adsorbants pour la désorption des colorants organiques (BM et FB). Mémoire de Master, Université Amar Telidji – Laghouat.
- [69] Bouchama, H. (2020). Étude de la désorption du Bleu de Méthylène à partir de charbon actif régénéré. Mémoire de Master, Université de Bab Ezzouar.
- [70] Laouer, A. (2021). Étude comparative de la désorption du Basic Fushin en milieu acide. Mémoire de Master, Université de Constantine 1.
- [71] Chaâlal, S. (2022). Étude de la désorption des colorants par des fibres végétales modifiées. Mémoire de Master, Université de Sétif.

عنوان المذكرة: تقييم أداء مادة مازة في إزالة امتزاز أصباغ عضوية

المؤطر: بوداود اسماء

الإسم: عبدالقادر

اللقب: لبق

ملخص: تهدف هذه المذكرة إلى تقييم أداء مادة مازة طبيعية مشتقة من نفايات زراعية في إزالة صبغتين عضويتين: أزرق الميثيلين BM والفوشين القاعدي FB. أظهرت التجارب أن أفضل شروط الامتزاز كانت عند $pH = 3$ لـ BM و $pH = 6$ لـ FB، بدرجة حرارة $50^{\circ}C$ ، ومدة تلامس 15 دقيقة لـ BM و 30 دقيقة لـ FB، مع مردود امتزاز قدره 90% و 91% على التوالي. أظهرت اختبارات إزالة الامتزاز أن HCl بتركيز 0.1N هو الأنسب، حيث بلغ معدل إزالة الامتزاز 48.43% لـ FB و 62% لـ BM. كما أظهرت المادة المازة قدرة على إعادة الاستخدام خلال 3 دورات دون فقدان ملحوظ في الكفاءة، مما يؤكد جدواها البيئية والاقتصادية.

كلمات مفتاحية: الامتزاز، إزالة الامتزاز، نفايات زراعية، أزرق الميثيلين، فوشين أساسي، المياه المستعملة.

Memory title: Evaluation of Adsorbent Performance for the Desorption of Organic Dyes

Name: Lebgaa

First name: Abdelkadir

Supervised by: Dr. Boudaoud Asma

Abstract : This thesis evaluates the performance of a natural adsorbent derived from agricultural waste for removing two organic dyes: Methylene Blue (BM) and Basic Fuchsin (FB). Experimental results identified the optimal adsorption conditions: $pH = 3$ for BM and $pH = 6$ for FB, temperature $50^{\circ}C$, and contact times of 15 min (BM) and 30 min (FB), achieving adsorption yields of 90% and 91%, respectively. Desorption tests with three solvents showed that HCl (0.1N) was the most effective, with desorption rates of 48.43% for FB and 62% for BM. The adsorbent was reusable for 3 cycles with no significant loss of efficiency, confirming its environmental and economic potential.

Key words: Adsorption, Desorption, Agricultural waste, Methylene Blue, Basic Fushin, Wastewater.

Titre du mémoire : Évaluation de la performance des adsorbants pour la désorption des colorants organiques

Nom : Lebgaa

Prénom : Abdelkadir

Encadreur : Dr. Boudaoud Asma

Résumé : Ce mémoire porte sur l'évaluation de la performance d'un adsorbant naturel issu de déchets agricoles pour l'élimination de deux colorants organiques : le Bleu de Méthylène (BM) et la Fuchsine Basique (FB). Les expériences ont permis d'identifier les conditions optimales d'adsorption : $pH = 3$ pour BM et $pH = 6$ pour FB, température de $50^{\circ}C$ et temps de contact de 15 min (BM) et 30 min (FB), avec des rendements d'adsorption de 90 % et 91 % respectivement. La désorption a été testée avec trois solvants, montrant que HCl (0,1N) est le plus efficace, atteignant 48,43 % pour FB et 62 % pour BM. L'adsorbant a pu être réutilisé pendant 3 cycles sans perte significative de performance, confirmant son potentiel écologique et économique.

Mots clés : Adsorption, Désorption, les déchets agricole, Bleu de Méthylène, Fuchsine Basique, Eaux usées.